



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓŁNOŚCI



Politechnika Wrocławskiego

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Robert Czabanowski

„SENSORY I SYSTEMY POMIAROWE”

nr UDA-POKL.04.01.02-00-065/09-01

Recenzent:

Prof. dr hab. inż. Dionizy Dudek

2010

Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
<http://www.oficyna.pwr.wroc.pl>
e-mail: oficyna@pwr.wroc.pl
zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-559-3

Spis treści

Spis treści	2
Wykaz oznaczeń	4
1. Wprowadzenie	5
2. Wiadomości wstępne.....	6
2.1 Definicje i pojęcia podstawowe.....	6
2.2. Metody pomiaru	7
2.3. Sygnały pomiarowe	7
2.4. Kryteria wyboru układu i doboru aparatury pomiarowej	9
2.5. Podział sensorów.....	11
2.6. Budowa systemu pomiarowego.....	13
2.7. Charakterystyki statyczne i dynamiczne elementów toru pomiarowego.	17
3. Zasady działania sensorów	20
3.1. Elementy rezystancyjne	20
3.2. Elementy pojemnościowe	34
3.3. Elementy indukcyjne.....	40
3.4. Elementy ultradźwiękowe.	49
3.5. Przetworniki optoelektroniczne.....	51
3.6. Czujniki fotooptyczne.	55
3.7. Termoelementy.....	60
3.8. Elementy piezoelektryczne.....	64
3.9. Elementy magnetośprężyste.	66
3.10. Elementy wykorzystujące zjawisko Halla.	68
4. Przetwarzanie analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe.	71
4.1. Próbkowanie.....	71
4.2. Kwantowanie.....	74
4.3. Kodowanie sygnałów.	75
4.4. Parametry przetworników A/C i C/A.	76
4.5. Przetworniki analogowo-cyfrowe (A/C)	77
4.6. Przetworniki cyfrowo-analogowe.....	83
4.7. Zasady doboru przetworników A/C i C/A.	85
5. Komputer w systemach pomiarowych	86
5.1. Przyrządy wirtualne i karty pomiarowe do komputerowych systemów pomiarowych.....	91
5.2. Modułowe systemy pomiarowe.....	94
5.3. Programy komputerowe w systemach pomiarowych.	96
6. Interfejsy pomiarowe.....	101
6.1. Metody koordynacji transmisji informacji.....	101
6.2. Interfejsy szeregowe.....	103
6.3. Interfejsy równoległe.....	111
6.4. Bezprzewodowe interfejsy pomiarowe.....	113
7. Zagadnienia wybrane.....	120
7.1. Bezkontaktowe pomiary temperatury.....	120

7.2.	Urządzenia do pomiaru przepływu w kanałach zamkniętych.....	126
7.3.	Wzmacniacze pomiarowe.....	134
7.4.	Tłumiki sygnałów elektrycznych.....	137
7.5.	Multipleksery analogowe.	138
7.6.	Filtry	138
7.7.	Urządzenia wskazujące	143
7.8.	Rejestratory	146
7.9.	Błędy pomiarowe.	148
7.10.	Zakłócenia elektryczne.....	150
7.11.	Micro Electro-Mechanical Systems - MEMS.....	151
7.12.	Standard Commands for Programmable Instruments - SCPI.....	154
7.13.	Transducer Electronic Data Sheet - TEDS	155
7.14.	Wielowymiarowe przetworniki siły.....	158
8.	Literatura.	160

Wykaz oznaczeń

R	–	rezystancja, Ω ,
T	–	temperatura, K ($^{\circ}\text{C}$),
ρ	–	opór właściwy, $\Omega\text{m}^2/\text{m}$,
ν	–	ułamek Poissona,
β	–	stała materiałowa termistora, K,
ε	–	wydłużenie względne,
δ	–	odległość, m,
F	–	powierzchnia, m^2 ,
C	–	pojemność kondensatora, F,
l	–	długość, m,
f	–	częstotliwość, Hz,
ω	–	pulsacja, Hz,
k	–	stała tensometru,
X	–	reaktancja, Ω ,
Z	–	impedancja, Ω ,
α	–	kąt, rad,
E	–	siła elektromotoryczna, V,
v	–	prędkość, m/s,
U	–	napięcie, V.

1. Wprowadzenie

Sensory i systemy pomiarowe to duży obszar współczesnej techniki i nie ogranicza się tylko do laboratorium. Większość mniej lub bardziej skomplikowanych urządzeń codziennego użytku jest wyposażana w układy sterowania, których nieodzownym składnikiem są układy pomiarowe z sensorami. Z uwagi na duży postęp w rozwoju elektroniki, informatyki a także wzrost wymagań użytkowników urządzeń, rośnie znaczenie komputerowych systemów pomiarowych, gdyż tylko wykorzystanie komputerów pozwala na automatyzację czynności pomiarowych lub też bezobsługową pracę systemów pomiarowych.

Skrypt ten powstał na potrzeby wykładu prowadzonego dla studentów kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej i jest efektem moich doświadczeń z wykładów i zajęć laboratoryjnych jakie prowadziłem przez kilka lat w ramach kursu „Sensory i systemy pomiarowe”. Zawartość skryptu to oczywiście subiektywny wybór autora i obejmuje obok omówionych pokrótkę zasad działania wybranych rodzajów sensorów, opis najczęściej stosowanych interfejsów komunikacyjnych, funkcji i struktury komputerowych systemów pomiarowych a także kilka zagadnień wybranych, które obejmują zarówno bezkontaktowe sposoby pomiaru temperatury, urządzenia do pomiaru przepływu, jak i omówienie niektórych elementów torów pomiarowych.

2. Wiadomości wstępne

2.1. Definicje i pojęcia podstawowe

W literaturze, w tym również tej dotyczącej techniki pomiarowej można spotkać różne definicje, często, z jednej strony, zbyt zawężające lub z drugiej strony, zbyt rozszerzające znaczenie słów sensor lub czujnik przypisując im zgoła inny sens. Jako przykład mogą posłużyć dwie poniższe definicje:

- sensor (łc. ‘ten, który odczuwa’ od sentire, sensum ‘czuć, odczuć’) 1. tech. łącznik elektr. sensorowy. 2. czujnik; sensorowy przełącznik (wyłącznik) s. – przełącznik (wyłącznik) elektr., działający pod wpływem impulsu cieplnego, świetlnego itp. [10],
- czujnik (angielskie sensor), w systemach czasu rzeczywistego cyfrowy lub analogowy element automatyki występujący między sterowanym urządzeniem a komputerem (mikrokontrolerem), wysyłający do komputera sygnały o stanie urządzenia [34].

Zdaniem autora, najlepszą definicją czujnika (sensora, przetwornika pomiarowego wielkości fizycznej) jest:

czujnik/sensor/przetwornik pomiarowy wielkości fizycznej – pierwszy element toru pomiarowego przekształcający wielkość mierzoną w sygnał pomiarowy.

Autor stanowczo uważa, że trzy wymienione wyżej nazwy są w tym kontekście synonimami i mogą być używane zamiennie.

Tor pomiarowy – to droga przebiegu sygnału od jego źródła, które stanowi badane zjawisko fizyczne, poprzez człony przetwarzające, porównujące i elementy transmisyjne – do urządzeń wyjściowych, przy pomocy których uzyskuje się zobrazowanie wyników pomiarów.

System pomiarowy – zestaw spełniających określone funkcje i współpracujących ze sobą przyrządów pomiarowych i urządzeń dodatkowych - przeznaczonych do zbierania, porównywania, rejestracji i przetwarzania sygnałów o mierzonych wielkościach fizycznych – umożliwiających określenie stanu obiektu badanego.

Analogowy system pomiarowy – przetwarzanie sygnału nie zmienia jego ciągłego charakteru, a wynik pomiaru przedstawia się w postaci odczytywanych lub rejestrowanych – najczęściej w funkcji czasu – sygnałów analogowych.

Cyfrowy system pomiarowy – na pewnym etapie przetwarzania sygnału pomiarowego występuje dyskretyzacja sygnału analogowego (przetwarzanie analogowo-cyfrowe) a wynik przedstawia się w postaci cyfrowej.

Pomiar – odwzorowanie obrazu rzeczywistości w obraz abstrakcji lub proces przetwarzania informacji o wielkości mierzonej w celu otrzymania wyniku ilościowego (przez porównanie z jednostką miary).

Jednostka miary – wartość danej wielkości umownie przyjętą jako mającą wartość liczbową równą jedności.

Sygnal – funkcja czasowa wielkości fizycznej, która posiada dwa elementy charakterystyczne: nośnik oraz parametr informacyjny. Z uwagi na charakter nośnika, rozróżnić można sygnały mechaniczne, pneumatyczne, świetlne i elektryczne. Najczęściej obecnie stosowane są w systemach pomiarowych sygnały elektryczne napięciowe lub prądowe. Odwzorowanie wielkości mierzonej następuje za pomocą parametru informacyjnego, który ma określony charakter zmienności wartościowej i czasowej. Parametrem informacyjnym może być amplituda, faza lub częstotliwość.

Charakterystyka statyczna przetwornika (lub toru pomiarowego) – funkcja uzależniająca wartość sygnału wyjściowego od wartości sygnału wejściowego w warunkach ustalonych, a więc w stanie gdy te sygnały się nie zmieniają.

Charakterystyka dynamiczna przetwornika (lub toru pomiarowego) – równanie (najczęściej) różniczkowe, uzależniające wielkość wyjściową i jej pochodne od wielkości wejściowej i jej pochodnych oraz od czasu.

2.2. Metody pomiaru

Metoda pomiaru to, ogólnie rzecz biorąc, zasada porównywania zastosowana przy pomiarze. Metody pomiaru możemy podzielić na:

- bezwzględne – bazujące na równaniu definicyjnym mierzonej wielkości,
- porównawcze – bazujące na porównaniu mierzonej wartości tej samej wielkości,
- różnicowe – polegające na pomiarze niewielkiej różnicy między mierzoną i znaną wartością tej samej wielkości.

Ze względu na sposób otrzymywania wyników pomiaru metody pomiaru dzielimy na:

- bezpośrednie – wynik pomiaru jest równoznaczny z odczytanymi wskazaniami mierników wyjściowych,
- pośrednie – wynik pomiaru otrzymuje się po wykonaniu określonych działań matematycznych na wartościach odczytyanych.

2.3. Sygnały pomiarowe

Sygnały pomiarowe mogące zmieniać się w dowolnej chwili nazywamy ciągłymi, natomiast sygnały nieciągłe to takie, które mogą zmieniać się w chwilach określonych, często odległych od siebie. Sygnały, których wartości są określone jednoznacznie w każdej chwili czasu traktujemy jako sygnały zdeterminowane, natomiast sygnały, których wartości nie można przewidzieć w wybranej chwili to sygnały losowe (stochastyczne). Z uwagi na charakter parametru informacyjnego sygnały możemy podzielić na:

- sygnały analogowe – parametr informacyjny może przyjmować dowolne wartości w określonych granicach z nieprzeliczalnego zbioru wartości,
- sygnały dyskretne – parametr informacyjny ma charakter skwantowany o skończonej liczbie wartości zawartych w określonych granicach,
- sygnały cyfrowe – sygnały skwantowane przedstawione w postaci ciągu elementów informacyjnych odwzorowujących liczbę.

Podczas pomiaru (w sensorze lub elementach toru pomiarowego) ulegają zmianom cechy jakościowe, ilościowe i morfologiczne sygnału niezbędne do otrzymania informacji o wielkości mierzonej w odpowiednim czasie i pożądanej formie.

W celu standaryzacji parametrów wejściowych i wyjściowych aparatury pomiarowej stosuje się standardowe sygnały pomiarowe. W większości systemów pomiarowych dominują sygnały elektryczne: analogowe lub cyfrowe. Wśród elektrycznych sygnałów analogowych możemy wyróżnić:

a) sygnały napięciowe:

$$\begin{aligned} & 0-10 \text{ V}, \\ & \pm 10 \text{ V}, \\ & \pm 5 \text{ V}, \end{aligned}$$

b) sygnały prądowe:

$$\begin{aligned} & 0-20 \text{ mA}, \\ & 4-20 \text{ mA}. \end{aligned}$$

Sygnały prądowe są bardziej odporne na zakłócenia i pozwalają na stosowanie dłuższych przewodów sygnałowych, a więc większe odległości pomiędzy elementami systemu pomiarowego.

Prądowy sygnał standardowy 4–20 mA jest nazywany sygnałem z „ żywym zerem”. Z uwagi na przesunięcie minimalnej wartości zakresu równej 4 mA, system pomiarowy może zdiagnozować awarię w przypadku gdy sygnał będzie miał wartość niższą niż dolna wartość zakresu.

2.3.1. Przetwarzanie sygnałów

Podczas pomiarów zawsze mamy do czynienia z przetwarzaniem sygnału. Już na pierwszym etapie, w pierwszym elemencie toru pomiarowego (a więc w czujniku) następuje zmiana sygnału pomiarowego, będącego najczęściej wielkością nieselektryczną, na elektryczny sygnał pomiarowy. Proces ten odbywać się może na dwa sposoby:

- wywołanie przyrostu wielkości elektrycznej od jednej wartości skończonej do drugiej w wyniku zmiany wartości wielkości nieselektrycznej (np. rezystancja tensometru oporowego wskutek wydłużenia),
- generowanie wielkości elektrycznej w wyniku doprowadzenia z zewnątrz energii innego rodzaju (np.: tachoprądnica – energia mechaniczna wywołuje powstanie siły elektromotorycznej).

Często, z uwagi na parametry stosowanej aparatury pomiarowej lub też z uwagi na sposób przesyłania sygnałów, zachodzi potrzeba zmiany wartości danej wielkości na inną w celu dopasowania sygnału wyjściowego przetwornika do warunków pomiaru zarówno pod względem zakresu (amplitudy), jak i związanej z nim energii. Zachodzi w wyniku: wzmacnienia amplitudy i/lub mocy sygnału, odgałęzienia do równolegle połączonego kanału sygnału o amplitudzie sygnału przetwarzanego (dzielniki napięcia, transformatory, wzmacniacze mocy). W wyniku takiego przetwarzania otrzymuje się wielkość fizyczną identyczną z wielkością przetwarzaną.

Przetwarzanie formy sygnału (zmiana jednego kształtu impulsu lub przebiegu na inny) ma na celu uzyskanie przebiegu o własnościach korzystniejszych niż przebieg otrzymywany z przetwornika pomiarowego. Podstawowe sposoby przetwarzania to: filtrowanie, prostowanie, modulacja, dyskretyzacja, kodowanie.

W niektórych systemach pomiarowych zachodzi potrzeba przetworzenia elektrycznego sygnału pomiarowego na efekt wizualny, akustyczny lub inny możliwy do odebrania przez obserwatora (zarejestrowania).

2.4. Kryteria wyboru układu i doboru aparatury pomiarowej

Na wybór układu pomiarowego i jego elementów ma wpływ cały szereg czynników, które muszą być wzięte pod uwagę przez projektanta systemu pomiarowego. Podstawową kwestią jest określenie czynników dominujących, czyli tych, które przyszły użytkownik systemu pomiarowego uzna za najważniejsze. Za najistotniejsze uważa się następujące kryteria:

- metrologiczne,
- wzajemne dopasowanie charakterystyk elementów układu,
- dopasowanie elementów do warunków eksploatacji,
- prostota konstrukcji,
- ekonomiczność układu.

Do metrologicznych kryteriów wyboru układu i doboru aparatury pomiarowej będziemy zaliczać:

- a) przedział zmian wartości wielkości mierzonej – zakres przetwornika musi obejmować znany lub spodziewany zakres zmian wartości mierzonej, inaczej mówiąc: przedział największej dokładności pomiaru i odczytu powinien pokrywać się z przedziałem najbardziej prawdopodobnych wartości wielkości mierzonej;
- b) sposób wykorzystania sygnału pomiarowego:
 - odczyt i rejestracja (oddzielnie lub łącznie) – wymaga wystarczającej dokładności pomiaru,
 - sygnalizacja – wymagana jest dostatecznie duża dokładność pomiaru oraz dopasowanie sygnału wyjściowego układu do parametrów wejściowych sygnalizatora,

- współpraca z układem automatycznej regulacji – sygnał wyjściowy musi być tego samego rodzaju co inne sygnały używane w układzie regulacyjnym, wszelkie nieliniowości wprowadzane przez układ pomiarowy są niepożądane i muszą być oczywiście znane i opisane, wymagana jest również znajomość charakterystyk dynamicznych poszczególnych członów i całego układu pomiarowego;
- c) charakterystyki statyczne przyrządów i układu – zalicza się do nich, obok charakterystyki uzależniającej wartość wielkości wyjściowej od wielkości wejściowej, charakterystyki błędów pomiaru i charakterystyki błędów nieliniowości;
- d) charakterystyki dynamiczne przyrządów i układu - podane w postaci transmitancji operatorowej lub widmowej, albo odpowiedzi jednostkowej lub harmonicznej albo też w postaci funkcji opisującej (dla członu nieliniowego);

Wzajemne dopasowanie charakterystyk elementów układu wymaga:

- doboru zakresów pracy poszczególnych elementów - takie zestawienie przyrządów pomiarowych, składających się na układ, aby przedziały zmienności wielkości wyjściowej i wejściowej elementów połączonych ze sobą były jednakowe (np. ten sam sygnał standardowy),
- dopasowania charakterystyk statycznych i dynamicznych - dobór elementów o takich charakterystykach, aby wynikowe charakterystyki statyczne i dynamiczne układu miały pożądany przebieg,
- zapewnienia właściwej współpracy poszczególnych elementów: - jak najmniejsze wzajemne obciążanie mocą przez przyrządy, unikanie szkodliwych sprzężeń indukcyjnych i pojemnościowych pomiędzy przyrządami i ich elementami (są one źródłami dodatkowych błędów pomiaru, a w przypadku elektronicznej aparatury mogą prowadzić do jej uszkodzenia), ograniczenie przenoszenia niepożądanej składowej stałej sygnałów, gdy układ przewidziany jest do pracy z sygnałem przemiennym, ograniczenie przenoszenia niepożądanych składowych zmiennych sygnałów, gdy układ przewidziany jest do pracy z sygnałem stałym, ograniczenie generowania lub przenoszenia niepożądanych sygnałów harmonicznych lub szumów;

Dopasowanie elementów do warunków eksploatacji polega na takim doborze elementów, aby:

- układ zapewniał żądaną dokładność pomiaru przy istnieniu określonego zespołu zewnętrznych czynników wymuszających, wynikających z eksploatacji,
- układ miał żądaną niezawodność i trwałość w warunkach działania na określonego zespołu czynników wymuszających,
- układ miał określoną żądaną przeciążalność statyczną, tj. nie ulegał zniszczeniu przy wzroście wartości wielkości wejściowej o określoną wartość ponad górną granicę znamionowego zakresu pomiarowego.

Prostota konstrukcji układu polega na minimalizacji liczby elementów składowych układu i liczby obwodów w układzie pomiarowym, stosowaniu przyrządów o najprostszej budowie, tj. mających możliwie mało elementów i obwodów a także przyrządów i elementów o budowie typowej, sprawdzonych pod względem niezawodności i trwałości; spełnienie tych kryteriów nie może naruszać spełnienia kryteriów metrologicznych (w zastosowaniach przemysłowych często lepiej jest zrezygnować z nadmiernej dokładności na rzecz prostoty układu pomiarowego i jego elementów, zwiększającej niezawodność i trwałość urządzeń).

Ekonomiczność układu to głównie minimalizacja nakładów inwestycyjnych przy zakupie i instalacji aparatury pomiarowej, a także kosztów: eksploatacji aparatury pomiarowej (w tym również obsługi, z uwagi na liczność i kwalifikacje personelu), przeglądów okresowych, bieżącej konserwacji, remontów bieżących i napraw, remontów kapitałnych i wymaganych legalizacji; należy również uwzględnić dostępność na rynku części składowych układu jak i części zapasowych oraz bliskość serwisu.

Kryteria doboru sensora (pierwszego elementu toru pomiarowego) będą się zawierały również w omówionych powyżej warunkach, należy dodać, że eksperymentator powinien uwzględnić: wpływ czujnika na proces lub stan maszyny, możliwość zabudowy w miejscu pomiaru i niewrażliwość czujnika na zakłócenia powstające w bezpośrednim otoczeniu (temperatura, ciśnienie, pole elektrostatyczne i magnetyczne).

2.5. Podział sensorów

Istnieje wiele sposobów klasyfikacji sensorów (czujników). Jednym z istotniejszych jest podział ze względu na zjawiska fizyczne wykorzystywane jako podstawa do realizacji czujnika. Z uwagi na sposób powstawania sygnału pomiarowego, czujniki można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

a) Elektryczne czujniki parametryczne – pod wpływem zmian wielkości mierzonej zmienia się parametr czujnika (rezystancja, indukcyność, pojemność). Wymagają one doprowadzenia energii pomocniczej - są włączane w obwód elektryczny zmieniając jego parametry pod wpływem sygnału wejściowego. Czujnikami parametrycznymi są np.:

- termometry rezystancyjne (różnych typów),
- tensometry,
- sensory pojemnościowe,
- sensory indukcyjnościowe,
- magnetorezystory,
- fotorezystory.

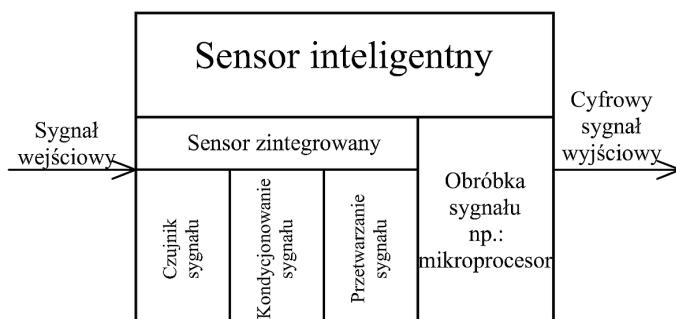
- b) Elektryczne czujniki generacyjne – pod wpływem działania wielkości mierzonej wytwarzają na swym wyjściu sygnał elektryczny. Przykłady czujników generacyjnych:
- termopary,
 - sensory piezoelektryczne,
 - hallotrony,
 - fotoogniwa,
 - sensory indukcyjne.

Autor celowo ograniczył przykłady czujników do sensorów z elektrycznym sygnałem wyjściowym z uwagi na dominującą rolę elektrycznych sygnałów pomiarowych.

Ze względu na skalę integracji sensory możemy podzielić na:

- a) sensory proste – czujniki, które przetwarzają fizyczną wielkość mierzoną na wielkość elektryczną (np.: siła elektromotoryczna SEM, ładunek, zmiana rezystancji),
- b) sensory zintegrowane – czujniki z wbudowanymi w swojej strukturze elementami przetwarzającymi (np.: wzmacniacze, filtry, kondycjonery, przetworniki A/C). W nowoczesnych sensorach są to specjalizowane układy scalone ASIC (ang. Application Specific Integrated Circuit).
- c) sensory intelligentne – czujniki o większym stopniu integracji zawierające w swojej strukturze więcej elementów dodatkowych, aż do mikroprocesorów, co uzyskuje się poprzez stosowanie specjalizowanych układów scalonych wielkiej skali integracji, w których całość, czujnik wraz z własnym mikrokontrolerem i elementami przetwarzającymi, jest zabudowana w jednej strukturze.

Stopnie integracji sensorów przedstawiono na rysunku 2.1.

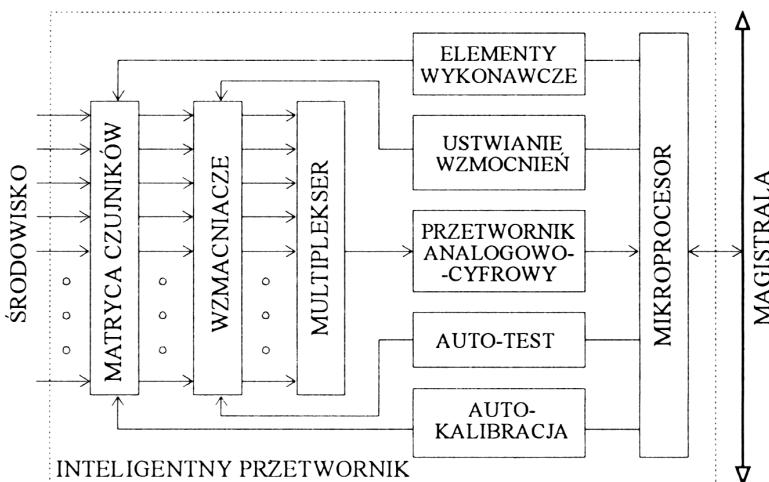


Rys. 2.1. Stopnie integracji sensorów [1]

Sensory intelligentne (ang. smart sensors), dzięki swojej rozbudowanej strukturze (rys. 2.2) mogą realizować często bardzo złożone funkcje, pozwalając znaczowo uprościć system pomiarowy. Do najważniejszych zadań należą:

- linearyzacja charakterystyk przetwornika,

- automatyczne sterowanie procesem porównywania ze wzorcem (np.: równoważenie),
- samoadaptacja (automatyczne ustawianie zakresu pomiarowego),
- rozpoznawanie i usuwanie błędów przejściowych,
- rejestracja danych,
- kompresja danych,
- wstępne statystyczne opracowywanie danych,
- sterowanie procesami wizualizacji (wyświetlania danych),
- sterowanie pracą wydzielonych bloków funkcyjnych (np.: przetworników A/C),
- autodiagnostyka poszczególnych bloków funkcyjnych,
- samonaprawialność,
- sterowanie pracą interfejsu zgodnie z przyjętym protokołem komunikacyjnym.

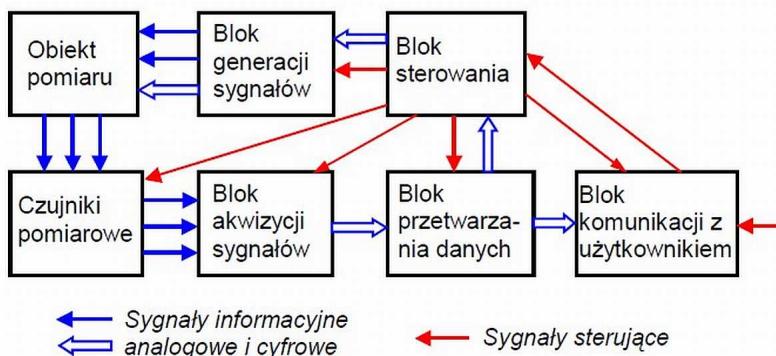


Rys. 2.2. Schemat blokowy inteligentnego przetwornika pomiarowego [12]

Z uwagi na dość wysokie koszty integracji sensorów, często korzystniejsze jest wykorzystanie, w miejsce układów wysokiej skali integracji, systemów modułowych, co, z jednej strony obniża koszty, a z drugiej zapewnia większą elastyczność przy tworzeniu systemów pomiarowych.

2.6. Budowa systemu pomiarowego

System pomiarowy, aby mógł spełniać swoją funkcję, w myśl przytoczonej wcześniej definicji, jest złożony z jednego lub wielu torów pomiarowych i wyposażony w sterownik, mikrokontroler lub komputer pełniący funkcję urządzenia zarządzającego. Struktura pojedynczego toru pomiarowego realizującego podstawowe funkcje jest przedstawiona na rysunku 2.3.



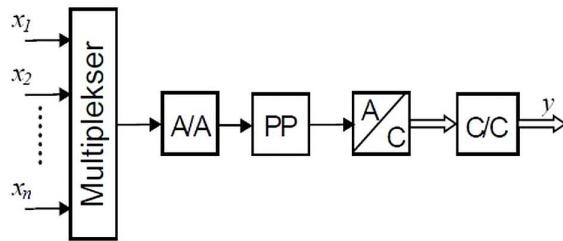
Rys. 2.3. Schemat funkcjonalny toru pomiarowego

Zadania poszczególnych bloków funkcyjnych:

- a) blok sterowania (zawiera sterownik) – zapewnia prawidłową pracę systemu, musi zawierać pamięć programu oraz układ realizujący ten program. Koordynuje działanie wszystkich bloków funkcyjnych, organizuje przepływ wszelkich informacji i odpowiada za realizację algorytmu działania systemu. Do podstawowych funkcji kontrolera należą: sterowanie aparaturą pomiarową i obiektem, zbieranie i magazynowanie danych pomiarowych, przetwarzanie danych pomiarowych;
- b) blok przetwarzania danych - obrabia cyfrowo dane pomiarowe zgodnie z przyjętym algorytmem;
- c) blok komunikacji z użytkownikiem – umożliwia użytkownikowi odbieranie i wprowadzanie informacji do systemu;
- d) blok generacji sygnałów - wytwarza sygnały: wymuszające, odniesienia, sterujące obiektem pomiarowym.

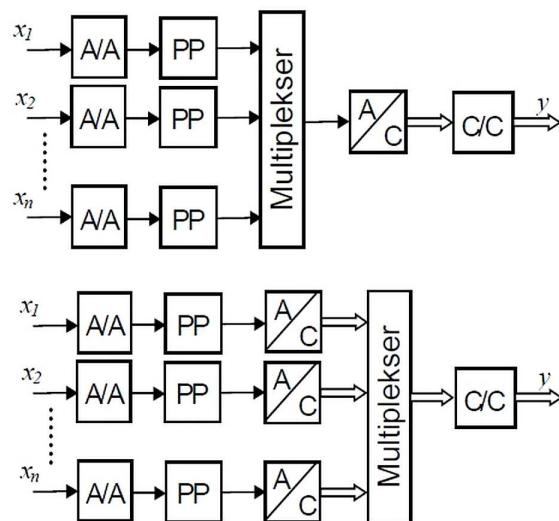
Na rysunkach 2.4 i 2.5 przedstawiono różne sposoby zbierania sygnałów z wielu źródeł (czujników). W zależności od konfiguracji systemu wymagana jest różna ilość urządzeń: przetworników A/C, układów formujących itd.

W rzeczywistości rzadko mamy do czynienia z torami pomiarowymi, w których poszczególne funkcje są realizowane przez osobne urządzenia. W zależności od skali integracji czujnika, a więc pierwszego elementu toru pomiarowego, niektóre funkcje mogą być realizowane przez sam czujnik, w którego obudowie mogą być zabudowane układy elektroniczne, które są odpowiedzialne za obróbkę sygnału wygenerowanego przez przetwornik pomiarowy. Podobnie jest z innymi urządzeniami pomiarowymi, np.: wielofunkcyjne karty pomiarowe, instalowane w komputerach osobistych mogą realizować cały szereg funkcji przetwarzania sygnału analogowego: filtracja, wzmacnianie, przetwarzanie analogowo-cyfrowe.



Rys. 2.4. Zbieranie wielu sygnałów z próbkowaniem sekwencyjnym

A/A - wejściowy układ formujący, PP - układ próbkująco-pamiętający, A/C - przetwornik analogowo-cyfrowy, C/C - wyjściowy układ formujący



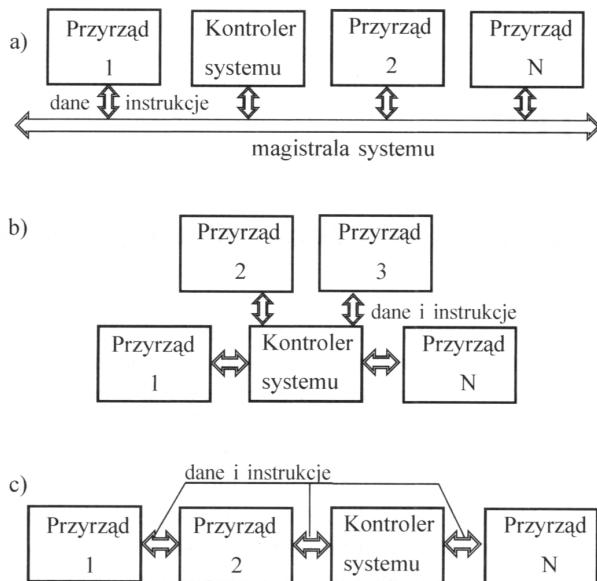
Rys. 2.5. Zbieranie wielu sygnałów z próbkowaniem jednaczesnym

A/A - wejściowy układ formujący, PP - układ próbkująco-pamiętający, A/C - przetwornik analogowo cyfrowy, C/C - wyjściowy układ formujący

Większość obecnie realizowanych systemów pomiarowych zasługuje na miano komputerowych systemów pomiarowych i bez znaczenia jest rodzaj użytej jednostki sterującej. Czasem będzie to po prosu komputer klasy PC wyposażony w odpowiednie urządzenia dodatkowe (interfejsy komunikacyjne, karty pomiarowe itd.) oraz stosowne sterowniki i oprogramowanie, w warunkach przemysłowych spotkamy sterowniki PLC lub mikrokontrolery (spotkać można również tzw. komputery przemysłowe, które są odpowiednikami komputerów klasy PC w obudowach i z interfejsami przeznaczonymi do trudnych warunków pracy) a czasem wbudowane w poszczególne urządzenia komputery jednoukładowe.

Komputerowy system pomiarowy może mieć różną konfigurację ze względu na sposób połączenia elementów z jednostką centralną. Wyróżniamy następujące konfiguracje (rys. 2.6):

- gwiazdową – wymaga liczby wejść jednostki sterującej odpowiadającej ilości elementów systemu, jednostka sterująca komunikuje się niezależnie z każdym z urządzeń, nie ma problemu adresowania, wadą jest utrudniona bądź niemożliwa rozbudowa systemu;
- posobna (szeregową) – wymiana informacji następuje tylko pomiędzy sąsiadującymi elementami, konfiguracja jest jeszcze trudniejsza do modyfikacji niż gwiazdowa – stosowana jest w układach o określonej drodze przesyłu informacji;
- liniowa (magistralowa) – najczęściej stosowana w przypadku bardziej złożonych struktur, wymiana informacji (danych i rozkazów) pomiędzy elementami następuje za pośrednictwem magistrali systemu – łatwa do modyfikacji, elastyczna struktura wymagająca określonego sposobu adresowania urządzeń.



Rys. 2.6. Konfiguracja systemu pomiarowego: a) liniowa (magistralowa), b) gwiazdowa, c) posobna [31]

Częstą praktyką jest budowanie systemu pomiarowego z wykorzystaniem tylko dwóch urządzeń połączonych ze sobą – przyrządu pomiarowego i komputera i w takim przypadku mamy do czynienia raczej z wyborem interfejsu niż konfiguracją systemu w rozumieniu powyższego podziału.

W analogowych systemach pomiarowych, na etapie akwizycji sygnału pomiarowego, muszą być zastosowane elementy do kondycjonowania sygnału. W ogólności kondycjonowanie to wstępna normalizacja sygnału analogowego, a więc,

dostosowanie postaci i zakresu zmienności sygnału do formy wymaganej na wejściu przetwornika A/C. Do zadań układów kondycjonowania należą:

- wytworzenie odpowiedniego poziomu sygnału wyjściowego dopasowanego do zakresu wejściowego przetwornika A/C,
- izolacja galwaniczna sygnału wejściowego od układów pomiarowych,
- ograniczenie pasma częstotliwościowego sygnału,
- usunięcie zakłóceń,
- linearyzacja,
- przełączanie sygnałów analogowych z czujników pomiarowych.

Przykłady kondycjonowania sygnałów z różnych czujników:

- termopary-wzmacnianie, linearyzacja, kompensacja temperatury zimnych końców,
- czujniki termorezystancyjne - zasilanie, linearyzacja,
- mostek tensometryczny - zasilanie mostka, wzmacnianie, linearyzacja, równoważenie mostka,
- przetworniki piezoelektryczne - wzmacnianie ładunku,
- indukcyjne czujniki położenia - zasilanie prądem zmiennym, linearyzacja, demodulacja.

Podstawowe elementy systemu pomiarowego przeznaczone do kondycjonowania sygnału to: wzmacniacze, tłumiki sygnałów elektrycznych, filtry, multipleksery, przetworniki analogowo-cyfrowe, urządzenia do wizualizacji, generatory sygnałów testowych, zasilacze.

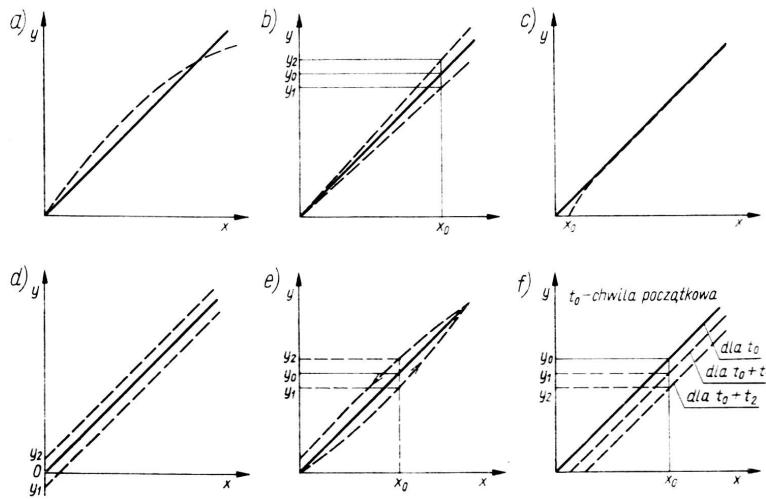
2.7. Charakterystyki statyczne i dynamiczne torów pomiarowych lub ich elementów

2.7.1. Charakterystyki statyczne torów pomiarowych lub ich elementów

Charakterystyki statyczne większości elementów toru pomiarowego można opisać za pomocą wielomianu:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (2.1)$$

W zależności od wartości poszczególnych składników szeregu (lub ich braku) powyższe równanie (2.1) przedstawia charakterystykę liniową lub nieliniową. Charakterystyki możemy uznać za liniowe, jeżeli spełniają warunki addytywności i jednorodności. Zwykle charakterystyki te opisywane są równaniami prostej, np.: $y=a_1x$ lub $y=a_0+a_1x$. Czasami można, wybierając odpowiednio fragmenty zakresu przetwarzania elementu o charakterystyce statycznej nieliniowej, aproksymować tę charakterystykę liniami prostymi (aproksymacja odcinkowa).



Rys. 2.7. Odchylenie kształtu i położenia rzeczywistych charakterystyk statycznych od kształtu i położenia liniowych charakterystyk idealnych wskutek: a) nieliniowości, b) zmiany czułości, c) progu czułości, d) przesunięcia zera, e) histerezy, f) dryftu (pełzanie) czasowego [41]

Do zjawisk, które mają istotny wpływ na charakterystyki statyczne, a także powodujące występowanie niedokładności przetwarzania statycznego, elementów toru pomiarowego należą:

- nieliniowość (rys. 2.7a),
- zmiana czułości (rys. 2.7b),
- próg czułości (rys. 2.7c),
- przesunięcie zera (rys. 2.7d),
- histereza (rys. 2.7e),
- dryft (pełzanie) (rys. 2.7f).

2.7.2. Charakterystyki dynamiczne sensorów (torów pomiarowych lub ich elementów)

Rzeczywiste elementy pomiarowe przenoszą sygnały z pewnym opóźnieniem, co wymaga opisania ich charakterystyk za pomocą równania różniczkowego, uzależniającego wielkość wyjściową i jej pochodne od wielkości wejściowej i jej pochodnych oraz czasu. Charakterystyki dynamiczne nieliniowe są opisywane równaniami różniczkowymi nieliniowymi. Z uwagi na prostotę opisu, przeprowadza się często (po spełnieniu odpowiednich warunków, np.: gdy w stanie nieustalonym odchylenia zmiennych x i y względem punku pracy są odpowiadającemu stanowi ustalonemu są dostatecznie małe) linearyzację, która pozwala na opis dynamiki elementu lub całego toru pomiarowego za pomocą równania liniowego o współczynnikach stałych. Umożliwia to przedstawienie właściwości dynamicznych za pomocą transmitancji operatorowej (w dziedzinie częstotliwości) lub transmitancji

widmowej (w dziedzinie częstotliwości ω). Transmitancją operatorową nazywa się stosunek transformat Laplace'a sygnału wyjściowego do wejściowego (przy zerowych warunkach początkowych) $G(s)=Y(s)/X(s)$. Zapis operatorowy umożliwia:

- używanie prostych związków algebraicznych pomiędzy transformatami sygnałów,
- klasyfikowanie elementów toru pomiarowego pod względem własności dynamicznych,
- określenie wypadkowej transmitancji toru na podstawie transmitancji elementów,
- wnioskowanie o strukturze toru pomiarowego na podstawie postaci transmitancji,
- łatwe analizowanie stanów przejściowych.

Charakterystyki w dziedzinie czasu uzyskuje się badając odpowiedź układu na impuls jednostkowy (Diraca) oraz skok jednostkowy.

Do przedstawiania właściwości dynamicznych w dziedzinie częstotliwości służą:

- charakterystyki amplitudowo-fazowe,
- charakterystyki amplitudowe,
- charakterystyki fazowe,
- logarytmiczne charakterystyki amplitudowe,
- logarytmiczne charakterystyki fazowe.

Charakterystyki dynamiczne uzyskuje się na drodze obliczeniowej lub doświadczalnej. Przy opisywaniu odpowiedzi na skok jednostkowy używa się następujących wskaźników porównawczych: stała czasowa, stała czasowa zastępcza, czas połówkowy, czas ustalania się odpowiedzi, czas narastania odpowiedzi.

3. Zasady działania sensorów

3.1. Elementy rezystancyjne

Elementy rezystancyjne obejmują bardzo dużą grupę czujników parametrycznych umożliwiających pomiar wielu wielkości fizycznych.

Przy pomiarach wielkości nieelektrycznych metodą oporową wykorzystuje się zjawiska występujące w przewodnikach stałych, półprzewodnikach oraz elektrolitach.

Opór elektryczny wyraża się:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{s} \quad (3.1)$$

gdzie:

ρ -opór właściwy, [$\Omega \text{ m}^2/\text{m}$],

l -długość, [m],

s -przekrój, [m^2].

Pomiar polega na wykorzystaniu zależności oporu elektrycznego elementu przetwarzającego, bezpośrednio od wielkości mierzonej lub innej wielkości od niej w określony sposób zależnej. Wielkość mierzona może być związana z następującymi wielkościami, wpływającymi na wartość oporu danego elementu:

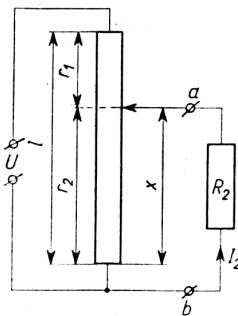
- oporem właściwym ρ ,
- długością elementu l ,
- oporem składowym szeregowego połączenia dwóch oporów stanowiących w sumie całkowity opór elementu.

W technice pomiarowej wykorzystuje się bezpośrednie zależności oporu właściwego ρ od temperatury i siły przyłożonej do elementu, długości l od przesunięcia liniowego lub kątowego.

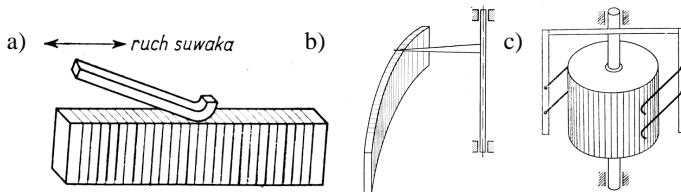
3.1.1. Przetworniki potencjometryczne

Potencjometry są elementami rezystancyjnymi, których rezystancja może się płynnie zmieniać w określonym zakresie wykorzystując ruch suwaka związanego z jednym z zestyków. Schemat oporowego dzielnika napięcia przedstawiono na rysunku 3.1. Spotykane są następujące sposoby realizacji przetworników potencjometrycznych liniowych:

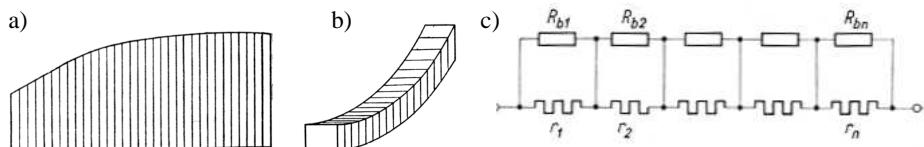
- z wzdłużnym ruchem suwaka (rys. 3.2a),
- z obrotowym ruchem suwaka: nawijane na karkasie zwijanym lub wygiętym (rys. 3.2b) $0 < \alpha < 360^\circ$, nawijane na karkasie cylindrycznym (rys. 3.2c) $0 < \alpha \leq 360^\circ$,
- z śrubowym ruchem suwaka $0 < \alpha \leq n \cdot 360^\circ$.



Rys. 3.1. Schemat oporowego dzielnika napięcia: l – długość dzielnika, x – długość części dołączanej do zacisków wejściowych, r_2 – opór części dołączanej do zacisków wyjściowych, r_1 – opór pozostałej części dzielnika, U – napięcie zasilania, a i b – zaciski wyjściowe [30]



Rys. 3.2. Realizacje potencjometrów liniowych: a) potencjometr liniowy z wzdłużnym ruchem suwaka, b) potencjometr liniowy z obrotowym ruchem suwaka nawijany na karkasie zwijanym lub wygiętym, c) potencjometr liniowy z obrotowym ruchem suwaka nawijany na karkasie walcowym [30]

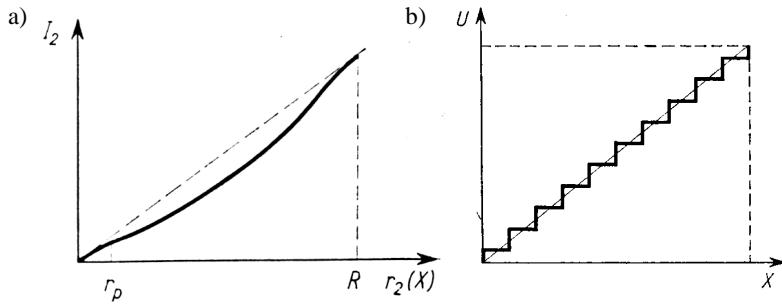


Rys. 3.3. Realizacje potencjometrów nieliniowych: a) na karkasie profilowym, b) potencjometr nieliniowy nawijany na karkasie krzywoliniowym o stałym przekroju, c) potencjometr nieliniowy z zbocznikowaną częścią potencjometru [30]

Gdy potrzebna jest nieliniowa charakterystyka wyjściowa potencjometru, to realizowane są one jako:

- nawijane z zmiennym skokiem,
- nawijane na karkasie profilowym (rys. 3.3a),
- nawijane na karkasie krzywoliniowym o stałym przekroju (rys. 3.3b),
- z zbocznikowaną częścią potencjometru (rys. 3.3c).

Charakterystyka potencjometru została przedstawiona na rysunku 3.4a, natomiast na rysunku 3.4b przedstawiono charakterystykę napięcia wyjściowego z uwzględnieniem schodkowości, która pokazuje wpływ konstrukcji potencjometru (nawijany z drutu oporowego) na sygnał wyjściowy.



Rys. 3.4. Charakterystyka wyjściowa potencjometru a) i charakterystyka napięcia wyjściowego z uwzględnieniem schodkowości (dla potencjometrów drutowych) [30]

Zakres liniowości dla przetworników potencjometrycznych zależy od dokładności wykonania i osiągać może 0,1%. Przetworniki potencjometryczne są stosowane do pomiaru przemieszczeń liniowych i kątowych w zakresie ograniczonym konstrukcyjnie:

- do 2000 mm – przetworniki liniowe,
- 0 – 360° - przetworniki kątowe jednoobrotowe,
- do 10 x 360° - przetworniki kątowe wieloobrotowe.

3.1.2. Elementy oporowe termometryczne

Elementy oporowe wykonane z materiału, którego opór zmienia się istotnie jako funkcja temperatury:

$$\frac{\Delta R}{R} = f(T) \quad (3.2)$$

Są wykonywane jako metalowe lub półprzewodnikowe. Zmiany temperatury można opisać równaniem:

$$R_T = R_0 (1 + a_1 T + a_2 T^2 + \dots + a_n T^n) \quad (3.3)$$

gdzie:

R_T - rezystancja w temperaturze $T^\circ\text{C}$,

R_0 - rezystancja w temperaturze odniesienia, 0°C ,

a_1, \dots, a_n - współczynniki stałe.

Liczba współczynników uwzględnianych w opisie zależy od materiału, zakresu temperatur i wymaganej dokładności przetwornika pomiarowego. W szerokim zakresie pomiarowym dobrą precyzję można uzyskać dla zależności:

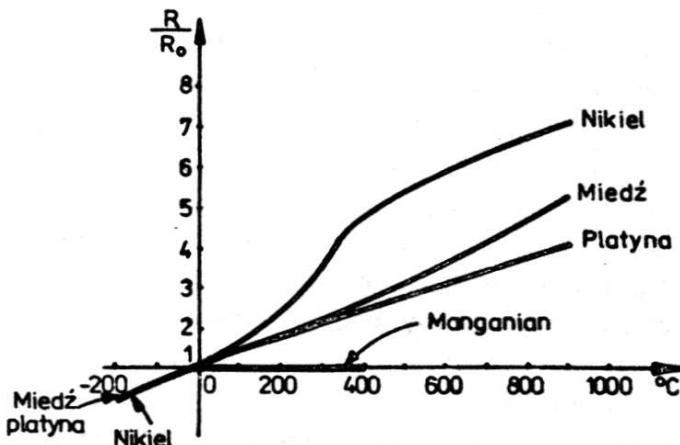
$$R_T = R_0 (1 + a_1 T + a_2 T^2) \quad (3.4)$$

a w ograniczonym zakresie temperatur można zastosować wzór:

$$R_T = R_0 (1 + a_1 T) \quad (3.5)$$

gdzie a_1 – współczynnik termicznej zmiany rezystancji z temperaturą, określający względną zmianę rezystancji przy zmianie temperatury o 1°C .

Metale wykazują najczęściej wzrost oporności ze wzrostem temperatury natomiast półprzewodniki spadek oporności (najczęściej).



Rys. 3.5. Zależność względnej rezystancji niektórych metali od temperatury [30]

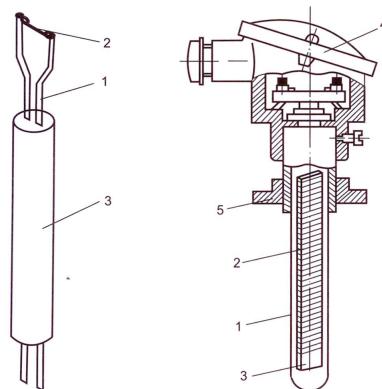
Najczęściej stosowane metale to: platyna, miedź, nikel. Standardowe czujniki platynowe mają rezystancję 100Ω (Pt100) lub 1000Ω (Pt1000) w temperaturze 0°C . Wyróżnianie platyny jest spowodowane jej charakterystyką, zwłaszcza w porównaniu z innymi metalami (rys. 3.5) oraz jej odpornością na korozję. Pożądane duże dokładności przetworników metalowych są uwarunkowane:

- wysoką czystością materiałów,
- starzeniem,
- konstrukcją mechaniczną zapewniającą brak naprężeń mechanicznych.

Dokładności pomiaru mogą sięgać $0,001^\circ\text{C}$, są uzyskiwane w specjalnych układach mostkowych w termometrach laboratoryjnych (rys. 3.6a). W zastosowaniach przemysłowych stosuje się czujniki przemysłowe (rys. 3.6b) klasy 0,5-1.

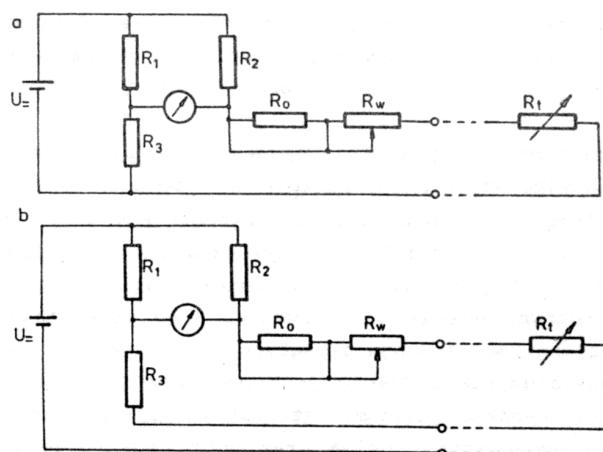
Przy pomiarach precyzyjnych (dokładność większa niż 1%) poniżej 20°C stosuje się mostki elektroniczne prądu stałego lub zmiennego równoważone automatycznie.

Przy pomiarach powyżej 10°C i dokładności 1% stosuje się mostki niezrównoważone z miliwoltomierzem na wyjściu.

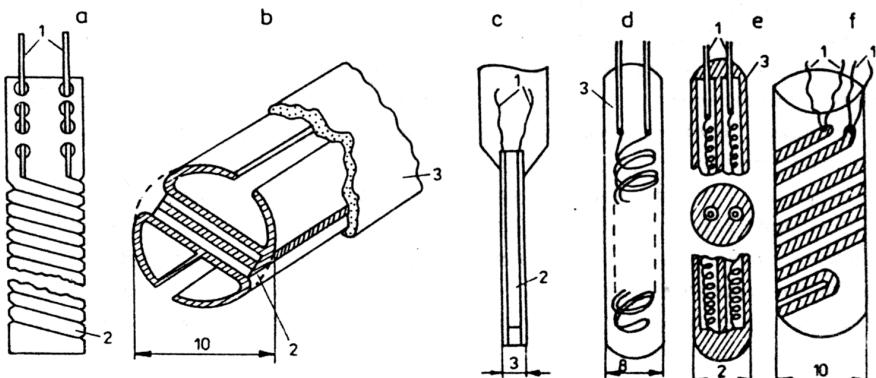


Rys. 3.6. Czujniki termometryczne: a) laboratoryjny (1-pręty widełek, 2-drut platynowy, 3-obsada izolacyjna), b) przemysłowy (1-metalowa osłona, 2-drut oporowy, 3-podkład izolacyjny, 4-złącza, 5-kołnierz) [36]

Najczęściej stosuje się układy pomiaru temperatury trójprzewodowe (uzyskujemy kompensację wpływu temperatury przewodów połączonych – wchodzą one w dwie gałęzie mostka) i dwuprzewodowe (niekorzystne, gdyż zmieniająca rezystancja przewodów przyłączonych wpływa na wynik pomiarów). Schematy obu układów przedstawiono na rysunku 3.7. Na rysunku 3.8 pokazano różne rozwiązania konstrukcyjne przetworników termometrycznych metalowych.



Rys. 3.7. Układy pomiaru temperatury termometrem oporowym: dwuprzewodowy i trójprzewodowy (R_1 , R_2 , R_3 – rezystory mostka, R_t – rezystor termometryczny, R_0 – rezystor do sprawdzania punktu początkowego punktu podzielnego, R_w – rezystor wyrównawczy) [51]



Rys. 3.8. Konstrukcje przetworników termometrycznych metalowych:

a) płytka izolacyjna z uwojeniem bifilarnym, b) z osłonami sprężynującymi, c) przetwornik płaski zaprasowany w metalowej osłonie, d) przetwornik platynowy zatopiony w szkle, e) przetwornik platynowy miniaturowy w osłonie z Al_2O_3 , f) przetwornik cienkowarstwowy (1-wyprowadzenie, 2-płytki z materiałem oporowym, 3 osłona) [51]

3.1.3. Elementy oporowe termometryczne półprzewodnikowe (termistory)

Termistorami nazywa się półprzewodnikowe rezystory odznaczające się tym, że ich rezystancja bardzo silnie zmienia się w miarę wzrostu temperatury (rys. 3.9). Rozróżnia się następujące grupy termistorów:

- o ujemnym temperaturowym współczynniku rezystancji – termistory NTC (ang. Negativ Temperature Coefficient),
- o dodatnim temperaturowym współczynniku rezystancji – termistory PTC (ang. Positive Temperature Coefficient),
- o skokowej zmianie rezystancji – termistory CTR (ang. Critical Temperature Resistor).

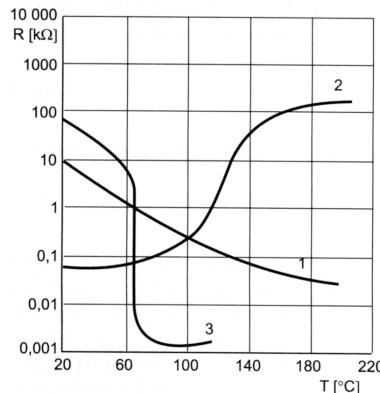
Termoelementy termistorowe, ze względu na dużą wartość temperaturowego współczynnika rezystancji w porównaniu z metalami, pozwalają na konstruowanie czujników znacznie czulszych od metalowych. Ważnymi zaletami termistorów są również:

- małe wymiary,
- mała bezwadność cieplna,
- duża rezystancja, która pozwala na realizację pomiarów w znacznie oddalonych miejscach, gdyż wpływ rezystancji przewodów jest znikomy.

Zakres temperatur wynosi od ok. -200°C do ok. 250°C dla termistorów zwykłych i dochodzi do 1200°C dla specjalnych termistorów żaroodpornych.

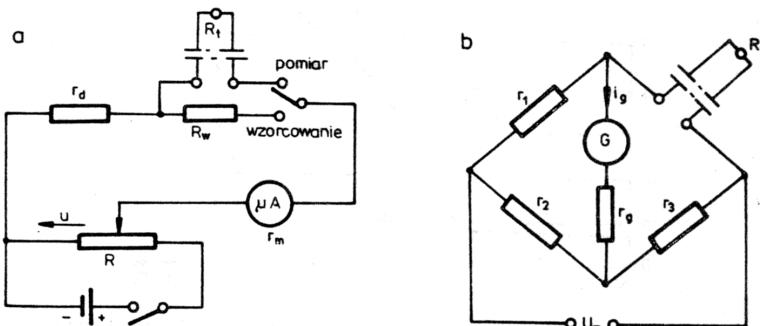
Uzyskiwana dokładność jest porównywalna z dokładnością termoelementów metalowych, natomiast czułości po zastosowaniu specjalnych wzmacniaczy dochodzą

do 10^4 °C. Wadami termistorów są: ich mała liniowość i trochę gorsza powtarzalność parametrów w porównaniu z termoelementami metalowymi.



Rys. 3.9. Zależność rezystancji termistorów od temperatury: 1-termistor NTC, 2-termistor PTC, 3-termistor CTR [32]

Układy do pomiaru temperatury z termistorem to obwód szeregowy (rys. 3.10a) lub mostek Wheatstone'a (rys. 3.10b). W układzie mostka uzyskujemy termometr o dużej czułości i zerowym wskazaniu na początku skali (gdy mostek jest w równowadze). Najprostszy termometr, o nieliniowej skali uzyskamy połączeniu czujnika w układ szeregowy.



Rys. 3.10. Układy do pomiaru temperatury z termistorem: a) szeregowy, b) mostkowy [51]

Jako czujniki wykorzystuje się głównie termistory NTC, wykonuje się je z mieszaniny tlenków różnych metali (miedzi, niklu, żelaza, tytanu cynku, kobaltu, litu, manganu i innych). Materiał formuje się zwykle w rdzeń, koralik lub płytce (baza elementów) a następnie spieka wraz z elektrodami odprowadzającymi (zwykle w postaci drutu o średnicy 50 µm). Rozmiary termistorów są bardzo małe i często nie przekraczają 2 mm. Spiekanie odbywa się przy zachowaniu ostrzych reżimów

technologicznych, a otrzymany spiek ma dużą trwałość i jest podobny do ceramiki. Po starzeniu, w celu osiągnięcia stabilności i powtarzalności wskazań, pokrywa się je szkliwem lub umieszcza w szklanych osłonach.

Zależność oporności od temperatury jest dla termistorów NTC jest wykładnicza i w przybliżeniu można ją przedstawić następująco:

$$R_T = R_o \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (3.6)$$

gdzie:

R_o – rezystancja termistora w znanej temperaturze T_0 (zwykle 298,15 K),

β - stała materiałowa termistora w K,

R_T – rezystancja termistora w mierzonej temperaturze T .

Wartości R_o wynoszą od kilku omów do 10 MΩ, przy czym niskoomowe termistory służą do pomiaru temperatur niskich, wysokoomowe do pomiaru temperatur wysokich. Stała materiałowa β ma wartość od 1500 do 6000 K (typowe wartości to ok. 4000 K).

Termistory PTC mają istotnie różną zależność oporności od temperatury w porównaniu z termistorem NTC. Dla czujnika w postaci kryształu krzemu jest prawie liniowa. Zakres pomiarowy jest niewielki (-45°C-180°C). Termistory PTC wytwarza się również z domieszkowanego tytanianu boru.

Termistory CTR wytwarzają się najczęściej z tlenku wanadu. Odznaczają się tym, że po przekroczeniu pewnej temperatury ich rezystancja gwałtownie maleje.

W zabezpieczeniach niektórych silników elektrycznych stosuje się podobne do termistorów półprzewodnikowe rezystancyjne czujniki temperatury serii KTY. Mają one dodatni współczynnik temperaturowy i charakterystykę o dość dobrej liniowości. Charakteryzują się zakresem pracy od -50 do 300 °C.

3.1.4. Elementy fotooporowe

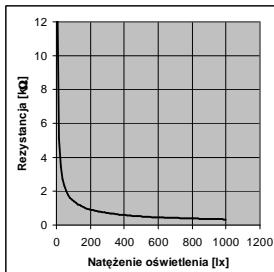
Są to elementy, których zasada działania polega na wykorzystaniu zjawiska fotoelektrycznego wewnętrznego. Zjawisko to, zachodzące w wielu ciałach krystalicznych polega na uwalnianiu pod wpływem światła elektronów z atomów. W oporniku elektrycznym pojawiają się swobodne elektrony wytrącone z atomów przez zaabsorbowane fotony (emisja pierwotna) jak również wytrącone przez elektrony pierwotne (emisja wtórna). Pojawienie się elektronów swobodnych, których liczba zależy od przekazanej energii promieniowania świetlnego (widzialnego, podczerwonego lub nadfioletowego), powoduje zmniejszenie się jego oporu elektrycznego (rys. 3.11). Charakterystykę fotorezystora selenowego przedstawiono na rysunku 3.12.

Czułość fotorezystorów zależy od długości fali światła na nie padającego oraz materiału, z którego są wykonane. Gama wykorzystywanych materiałów jest szeroka (dla niektórych podano długości fali świetlnej) :

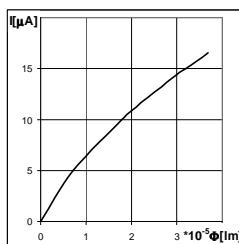
- selen ($\lambda_{ext}=640$ nm),
- siarczek ołowiu $\lambda_{ext}=2500$ nm),
- siarczek bizmutu $\lambda_{ext}=1500-2500$ nm),
- stopy siarczku i tlenku talu,
- związki kadmu: CdS, CdSe, CdTe,
- ZnO, InSb, InAs, Ge, Si.

Istotnymi wadami fotorezystorów są:

- stosunkowo duża bezwładność,
- spadek czułości przy oświetleniu zmiennym,
- znaczny wpływ temperatury na czułość.



Rys. 3.11. Rezystancja elementu fotooporowego w funkcji natężenia oświetlenia [29]



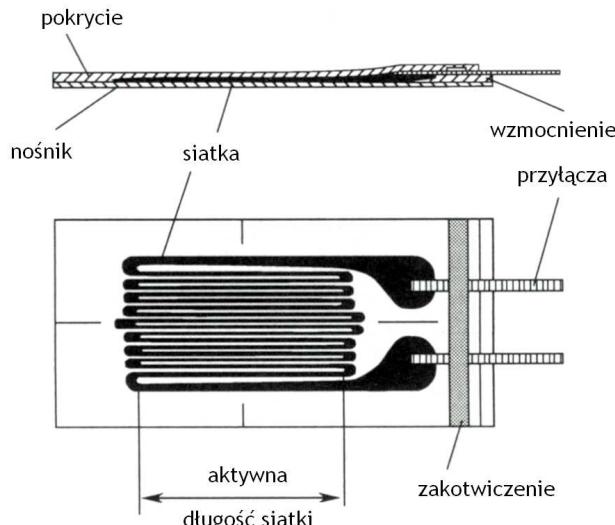
Rys. 3.12. Charakterystyka fotorezystora selenowego [30]

Fotorezystory pracują w obwodach prądu stałego i przemienneego, wykorzystywane są do wykrywania i pomiaru sygnałów świetlnych (np.: pomiaru światła w aparatach fotograficznych).

3.1.5. Elementy oporowe tensometryczne

Tensometrem oporowym nazywamy element rezystancyjny, w którym zmiana rezystancji następuje pod wpływem oddziaływań zewnętrznych, np.: sił rozciągających lub ściskających.

Na rysunku 3.13. pokazano budowę typowego tensometru. Zbudowany jest z cienkiego drutu oporowego (średnice rzędu 10^{-2} mm) wklejonego pomiędzy dwie warstwy papieru lub folii. Obecnie większe znaczenie zyskują tensometry foliowe, a także tensometry specjalne, w których materiał oporowy jest nanoszony wprost na powierzchnię obiektu badanego, bez pośrednictwa kleju, np.: metodą napylania. Materiał oporowy stosowany do budowy tensometrów powinien odznaczać się bardzo małym termicznym współczynnikiem oporu.



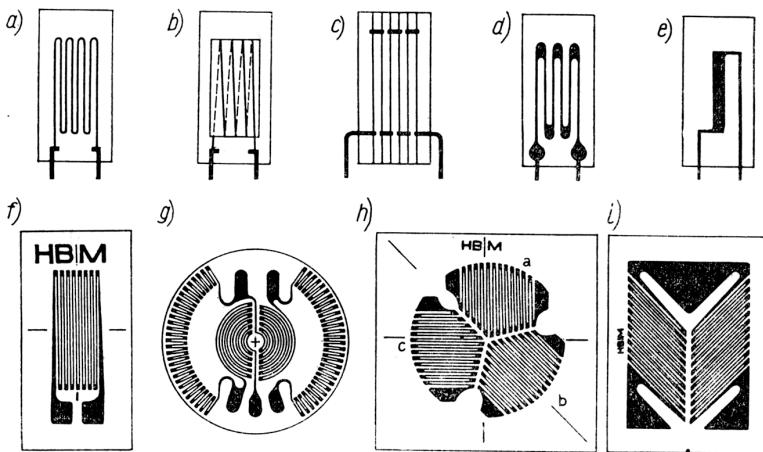
Rys. 3.13. Budowa tensometru [1]

Siatki rezystancyjne tensometrów mogą być ukształtowane w różny sposób (rys. 3.14). Z punktu widzenia konstruktora przetwornika pomiarowego duże znaczenie mają tensometry zbudowane jako układ kilku siatek rezystancyjnych, gdyż pozwalają one w stosunkowo łatwy sposób budować nawet bardzo złożone układy umożliwiające np.: kompensację wpływu temperatury.

Obok geometrii siatki rezystancyjnej, wymienić należy kilka najistotniejszych parametrów tensometrów, są to:

- stała tensometru,
- rezystancja w stanie nieodkształconym,
- aktywna długość siatki (baza tensometru),
- dopuszczalne odkształcenie,
- liczba cykli (trwałość dynamiczna),
- współczynnik temperaturowy rezystancji,
- liniowość.

Wartości powyższych parametrów dla najbardziej popularnych rodzajów tensometrów zamieszczono w tablicy 3.1.



Rys. 3.14. Układy siatek rezystancyjnych tensometrów różnych typów: a) wężkowatego, b) zygzakowego, c) kratowego, d) foliowego, e) półprzewodnikowego, f) foliowego pojedynczego, g) membranowego, h) rozety prostokątnej, i) do pomiarów naprężen stycznych [39]

Względna czułość (stała) tensometru ujmuje zależność wzajemną zmiany rezystancji od odkształcenia wzajemnego:

$$k = \frac{\Delta R}{\frac{R}{\epsilon}} \quad (3.7)$$

i dla metali wynosi $k=-12\dots+19$ a dla materiałów półprzewodnikowych $k=-100\dots200$.

Zmiany rezystancji tensometru uzależnione są od stałych materiałowych i wzajemnych wydłużen siatki:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu + C - 2C\nu) \frac{\Delta l}{l} \quad (3.8)$$

gdzie:

ν - ułamek Poissona,

C – stała Bridgmana.

Wyrażenie $(1+2\nu)$ ujmuje wpływ zmian rozmiarów geometrycznych i ma dominujące znaczenie w tensometrach metalowych), natomiast wyrażenie $(C-2C\nu)$ ujmuje wpływ zmian rezystywności, dominujący w tensometrach półprzewodnikowych.

W ogromnej większości aplikacji tensometry nakleja się specjalnym klejem na element konstrukcyjny, którego odkształcenia chcemy mierzyć. Klej, podobnie jak

tensometr, powinien być dostosowany do materiału elementu konstrukcyjnego, a sama powierzchnia przygotowana do klejenia zgodnie z zaleceniami producenta kleju i tensometru, absolutnym minimum jest oczyszczenie mechaniczne (np.: szlifowanie) oraz odtłuszczenie powierzchni.

Tab. 3.1. Elementy oporowe tensometryczne – podstawowe parametry [39]

Tensometry			
Wielkość charakterystyczna	drutowe	foliowe	półprzewodnikowe
Materiał siatki rezystancyjnej	Konstantan Nichrom Elinwar		Ge z domieszkami typu n i p, Si z domieszkami typu p
	Drut $\Phi 12..50 \mu\text{m}$	Folia o grubości $3..8 \mu\text{m}$	
Rezystancja [Ω]	120, 300, 350, 500, 600, 1000		10..100000
Długość bazy pomiarowej [mm]	3..150	0,2..150	0,2..20
Stała tensometru	2,1 (Konstantan) 2,1 (Nichrom) 3,6 (Elinwar)		-100..200
Liniowość [%]	$\pm 0,1 (\varepsilon < 0,4\%)$ $\pm 1 (\varepsilon < 1\%)$		1 ($\varepsilon < 0,1\%$)
Dopuszczalne odkształcenie [%]	1..2	3..4	0,5
Liczba cykli (trwałość dynamiczna)	10^7		10^6
Współczynnik temperaturowy rezystancji $[(\Delta R/R)/K]$	$-3,9 \cdot 10^{-6}..6 \cdot 10^{-3}$	$\pm 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-4}..3 \cdot 10^{-3}$

Warunkiem stosownalności metody tensometrycznej jest równość wydłużenia względnego tensometru ε_t i wydłużenia względnego elementu konstrukcyjnego ε_r :

$$\varepsilon_t = \varepsilon_r = \varepsilon \quad (3.9)$$

Przy znanych parametrach materiału (moduł Younga E) i parametrach geometrycznych można, korzystając z prawa Hooke'a (3.10) określić wielkość mierzoną, np.: naprężenia, siłę lub moment.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.10)$$

Względną zmianę rezystancji tensometru obciążonego mechanicznie przy zmianie temperatury o ΔT określa wzór:

$$\frac{\Delta R}{R} = k\epsilon + [\alpha_R + k(\alpha_p - \alpha_t)]\Delta T \quad (3.11)$$

gdzie

k – stała tensometru,

ϵ – odkształcenie względne,

α_R – temperaturowy współczynnik zmiany rezystancji materiału siatki,

α_p – temp. współczynnik rozszerzalności liniowej materiału podłożą,

α_t – temp. współczynnik rozszerzalności liniowej materiału siatki rezystancyjnej,

ΔT – zakres zmiany temperatury.

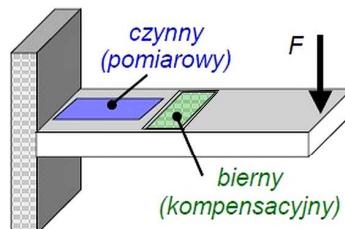
Miarą zmian rezystancji występujących pod wpływem odkształceń mechanicznych jest iloczyn $k\epsilon$, natomiast wyrażenie $\alpha_R + k(\alpha_p - \alpha_t)$ – jest efektem zmian rezystancji przyklejonego tensometru przy zmianie temperatury ΔT , odpowiada ono tak zwanemu odkształceniom pozornemu.

Z uwagi na to, że zmiany rezystancji tensometrów pod wpływem odkształceń mechanicznych mogą być porównywalne ze zmianami rezystancji przy zmianie temperatury tylko o kilka stopni Celcjusza, niezbędna jest kompensacja termiczna:

$$\alpha_w = \alpha_R + k(\alpha_p - \alpha_t) = 0 \quad (3.12)$$

Stosuje się następujące metody kompensacji błędów temperaturowych:

- stosowanie tensometrów samokompensujących (siatki rezystancyjne wykonane ze specjalnych stopów rezystancyjnych i które są przeznaczone do użycia na określonych podłożach, dla których $\alpha_p = \alpha_t$),
- dołączanie tak zwanych tensometrów kompensacyjnych – stosuje się w układach półmostkowych i pełnomostkowych (rys. 3.15),
- montowanie mikrotermoelementów w bezpośrednim sąsiedztwie tensometrów, których napięcie dodając się do napięcia wyjściowego mostków, kompensuje dodatkowy sygnał błędu.



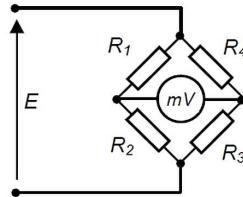
Rys. 3.15. Kompensacja wpływu temperatury przy pomocy tensometrów kompensacyjnych

Ze względu na niewielkie względne zmiany rezystancji tensometru (do ok. 0,1%) w pomiarach stosuje się odpowiednio czułe wzmacniacze pomiarowe, a tensometry łączy się w układy mostka Wheatstone'a (rys. 3.16), co pozwala w sposób dokładny mierzyć nawet niewielkie zmiany rezystancji (odkształcenia). Warunek równowagi mostka:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \quad (3.13)$$

a napięcie niezrównoważenia:

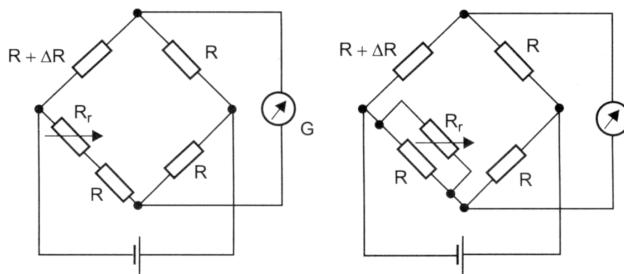
$$U = E \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (3.14)$$



Rys. 3.16. Mostek Wheatstone'a

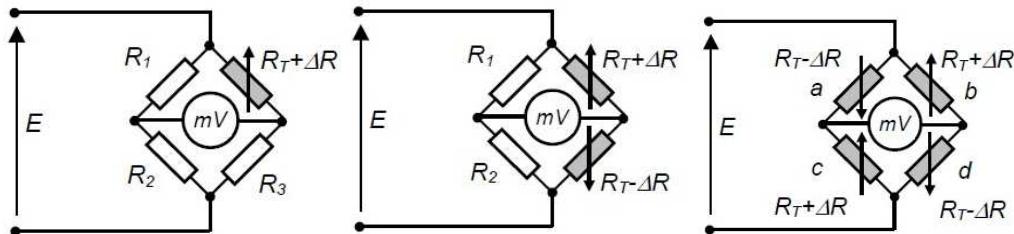
Przy pomiarach najczęściej stosowana jest metoda wychylowa, polegająca na pomiarze napięcia niezrównoważenia mostka jako sygnału wyjściowego. Stosowana czasem metoda zerowa jest nieprzydatna przy pomiarach wielkości szybkozmiennych.

Aparatura wykorzystywana przy pomiarach z użyciem układów mostkowych powinna zasilać układ (stosowane są zarówno układy stałoprądowe jak i zmiennoprądowe) i umożliwiać równoważenie mostka, co można zrealizować poprzez zmianę rezystancji jednej z gałęzi mostka – stosowane są układy szeregowe (rzadziej) i równoległe (rys. 3.17).



Rys. 3.17. Równoważenie mostka tensometrycznego poprzez zmianę rezystancji: układ szeregowy i równoległy [39]

W zależności od wymagań stosuje się układy pomiarowe z różną ilością czynnych tensometrów (rezystorów) w układzie mostkowym (rys. 3.18), co skutkuje różnymi wartościami napięcia niezrównoważenia.



Rys. 3.18. Różne wersje układu mostkowego: ćwierć-mostek, pół-mostek, pełny mostek

Przetworniki tensometryczne umożliwiają pomiar wielu wielkości fizycznych: siła, ciśnienie, moment gnący i obrotowy, przemieszczenie, odkształcenie, przyśpieszenie, temperatura, natężenie przepływu itd. Ograniczeniem jest możliwość powiązania odkształceń elementu na którym naklejone są tensometry ze zjawiskiem (wielkością fizyczną), które chcemy identyfikować lub mierzyć.

3.2. Elementy pojemnościowe

Elementem pojemnościowym nazywamy taki, którego zadaniem jest przetworzenie dowolnej wielkości, nieelektrycznej lub elektrycznej, na elektryczny sygnał napięciowy lub prądowy, przy czym przetworzenie to następuje przy wykorzystaniu zmiany pojemności w jednej lub kilku gałęziach elektrycznego obwodu pomiarowego. Do podstawowych zalet elementów pojemnościowych należą:

- prostota budowy,
- proste zależności matematyczne opisujące właściwości,
- możliwość stosowania w środowiskach dielektrycznych.

Zasada działania elementów pojemnościowych bazuje na zależnościach określających pojemność kondensatora płaskiego:

$$C = \frac{\epsilon F}{\delta} \quad (3.15)$$

i walcowego:

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.16)$$

gdzie:

C - pojemność kondensatora,

ϵ - przenikalność dielektryczna pomiędzy okładzinami,

F - powierzchnia okładziny,

δ - odległość okładzin,

l - wysokość walców,

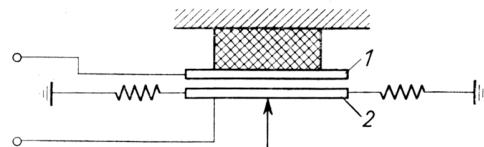
r_2, r_1 - promień zewnętrzny i wewnętrzny walców.

Z uwagi na zasadę działania, elementy pojemnościowe możemy podzielić następująco:

- elementy o zmiennej odległości elektrod,
- elementy różnicowe o zmiennej odległości elektrod,
- elementy o zmiennej powierzchni czynnej elektrod,
- elementy o zmiennej przenikalności dielektrycznej.

3.2.1. Elementy pojemnościowe o zmiennej odległości elektrod

Zasadę działania elementów pojemnościowych o zmiennej odległości elektrod pokazano na rysunku 3.19. Sygnałem wejściowym (powiązanym z wielkością mierzoną) jest przesunięcie elementu ruchomego, sygnałem wyjściowym jest zmiana pojemności.



Rys. 3.19. Zasada działania elementów pojemnościowych o zmiennej odległości elektrod [30]

Pojemność kondensatora na rysunku 3.19:

$$C = \epsilon \frac{F}{\delta_0 + \Delta\delta} \quad (3.17)$$

a zmiana pojemności wynikająca z przesunięcia jednej z okładek:

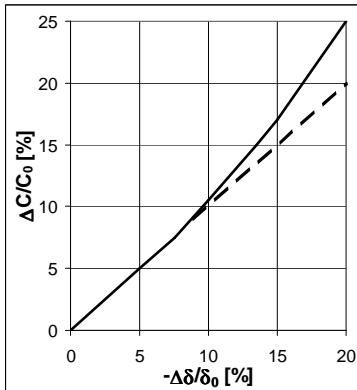
$$\Delta C = C - C_0 = \epsilon F \left(\frac{1}{\delta_0 + \Delta\delta} - \frac{1}{\delta_0} \right) \quad (3.18)$$

Stąd, względna zmiana pojemności:

$$\frac{\Delta C}{C} = -\frac{\frac{\Delta \delta}{\delta_0}}{1 - \frac{\Delta \delta}{\delta_0}} \quad (3.19)$$

Znak „-” pokazuje, że zwiększenie odległości powoduje zmniejszenie pojemności kondensatora.

Na rysunku 3.20 przedstawiono charakterystykę statyczną elementu pojemnościowego o zmiennej odległości elektrod. Jest on nieliniowa, ale przy ograniczeniu zakresu można założyć liniowość charakterystyki (do ok. 5% przesunięcia względnego) – przy większych przesunięciach stosowane są układy lub procedury linearyzujące.



Rys. 3.20. Nieliniowa charakterystyka statyczna przetwornika pojemnościowego [30]

Elementy te znalazły zastosowanie do pomiaru grubości, siły, ciśnienia i małych przesunięć liniowych. Dużą czułość uzyskuje się przy stosowaniu małych odległości początkowych δ_0 pomiędzy elektrodami. Ograniczeniem są wzgłydy izolacyjne (możliwość przebicia).

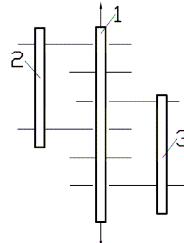
Do tej grupy elementów należą elementy membranowe, służące głównie do pomiaru ciśnienia oraz elementy z drgającą okładziną.

W elementach membranowych elektrodą ruchomą jest membrana przemieszczająca się pod wpływem ciśnienia. W elementach z drgającą okładziną jest ona prawiana w ruch drgający dla uzyskania okresowej zmienności pojemności w czasie. Stosuje się w urządzeniach do przemiany stałej SEM na SEM pulsującą.

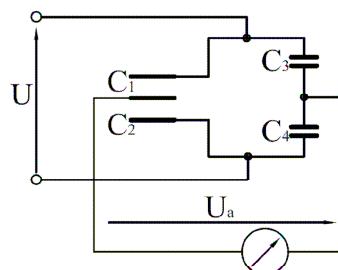
3.2.2. Elementy pojemnościowe różnicowe o zmiennej odległości elektrod

Zasadę działania różnicowego elementu pojemnościowego o zmiennej odległości elektrod pokazano na rysunku 3.21. Przesunięcie okładzin 1 powoduje zbliżenie się

ich do okładzin 3, a oddalenie od okładzin 2. Powoduje to wzrost pojemności układu 1-3 i spadek pojemności układu 1-2. Wskazania mostka (rys. 3.22), do którego włącza się taki element, są zależne od obu tych pojemności.



Rys. 3.21. Zasada działania różnicowego elementu pojemnościowego o zmiennej odległości elektrod (1, 2, 3 – okładziny) [30]



Rys. 3.22. Schemat układu pomiarowego z pojemnościowym elementem różnicowym [30]

Napięcie wyjściowe mostka:

$$U_a = U \left(\frac{\frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_4}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4}} \right) \quad (3.20)$$

gdzie: C_1, C_2, C_3, C_4 – pojemności kondensatorów układu pomiarowego (rys. 3.22).

Pojemności kondensatora różnicowego po przesunięciu okładziny ruchomej:

$$C_1 = \epsilon F \frac{1}{\delta_0 + \Delta\delta} \quad (3.21)$$

$$C_2 = \epsilon F \frac{1}{\delta_0 - \Delta\delta} \quad (3.22)$$

gdzie:

$\Delta\delta$ - przesunięcie okładziny ruchomej,

δ_0 - początkowa odległość elektrod.

Warunek równowagi mostka:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{C_3}{C_4} \quad (3.23)$$

w położeniu zerowym, gdy $C_1=C_2$ to $C_3=C_4$, po uwzględnieniu (3.21-3.23) napięcie wyjściowe U_a wynosi:

$$U_a = U \frac{\Delta\delta}{2\delta_0} \quad (3.24)$$

Jest to funkcja liniowa, $U_a=f(\Delta\delta)$, co jest wykorzystywane do budowy przetworników do pomiaru przemieszczeń liniowych.

3.2.3. Elementy pojemnościowe o zmiennej powierzchni czynnej elektrod

Elementy o zmiennej powierzchni czynnej elektrod są wykonywane jako obrotowe. Obrót ruchomej okładziny o pewien kąt α powoduje zmianę pojemności kondensatora. Przy założeniu, że kondensator ma kołowe okładziny, otrzymujemy zależność:

$$C = C_0 + k\alpha \quad (3.25)$$

gdzie:

C_0 – pojemność początkowa,

k – stała.

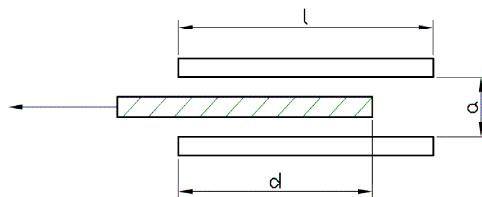
Zmiana pojemności kondensatora:

$$\Delta C = k\alpha \quad (3.26)$$

jest liniowo zależna od kata obrotu α i może być jego miarą. Elementy takie są również wykonywane w układzie różnicowym.

3.2.4. Elementy pojemnościowe o zmiennej przenikalności dielektrycznej

Zasadę działania elementów pojemnościowych o zmiennej przenikalności dielektrycznej pokazano na rysunku 3.23. Wykorzystują one zależność pojemności od stałej dielektrycznej ośrodka pomiędzy okładzinami kondensatora. Stały dielektryk przesuwa się pomiędzy okładzinami odwzorowując mierzone przemieszczenie liniowe.



Rys. 3.23. Zasada działania elementu pojemnościowego o zmiennej przenikalności dielektrycznej [30]

Pojemność elementu:

$$C = \frac{\epsilon_0 b}{a} [l + d(\epsilon' - 1)] \quad (3.27)$$

gdzie:

l - długość okładzin,

b - szerokość okładzin,

d - długość odcinka pomiarowego,

ϵ' - względna przenikalność dielektryczna rdzenia.

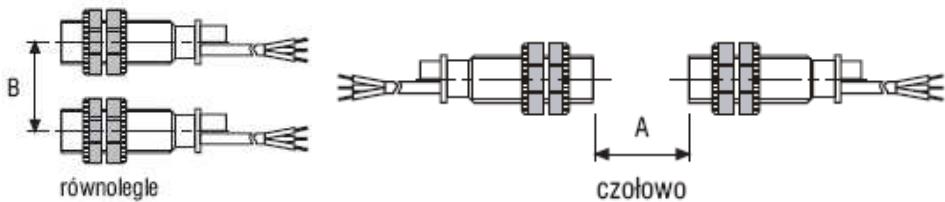
Zmiana pojemności elementu:

$$\Delta C = \epsilon_0 (\epsilon' - 1) b \frac{d}{a} \quad (3.28)$$

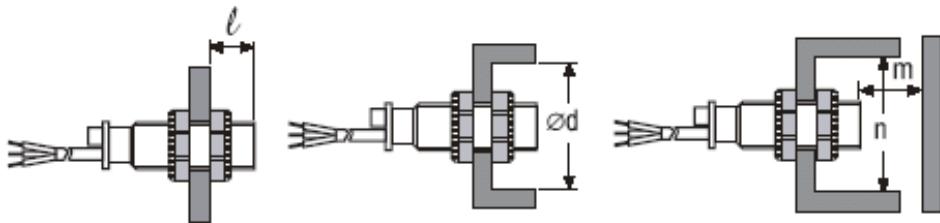
Elementy o zmiennej przenikalności znajdują zastosowanie przy pomiarach przesunięć liniowych, pomiarach poziomu cieczy i ciał sypkich oraz przy pomiarach materiałów dielektrycznych.

Z uwagi na charakter pracy elementów pojemnościowych pełniących funkcję czujników zbliżeniowych, istotne jest, przy planowaniu rozmieszczenia, uwzględnianie odległości pomiędzy aktywnymi elementami pomiarowymi (rys. 3.24). i elementami zabudowy (rys. 3.25). Wzajemny wpływ pracujących obok siebie czujników, może powodować ich niepoprawne funkcjonowanie. Z tego powodu należy zachować zalecane dla poszczególnych typów wzajemne odległości. Jeżeli

czujniki są montowane na elementach metalowych, muszą być zabezpieczone tak, aby oddzielić wpływ otoczenia na zdolność detekcji obiektu wykrywanego.



Rys. 3.24. Wzajemny wpływ pracujących obok siebie czujników [15]



Rys. 3.25. Wpływ otoczenia metalowego [15]

3.3. Elementy indukcyjne

Elementem indukcyjnym nazywamy urządzenie, którego zadaniem jest przetworzenie dowolnej wielkości nieselektrycznej lub elektrycznej na elektryczny sygnał napięciowy lub prądowy. Sygnał powstaje przy wykorzystaniu zjawiska indukcji elektromagnetycznej.

Zalety elementów indukcyjnych:

- duża czułość i sztywność układu,
- stateczne i bezstopniowe przekazywanie sygnału,
- mała siła oddziaływania,
- duża pewność ruchu.

Elementy indukcyjne są używane do pomiaru przesunięć oraz dowolnych wielkości fizycznych (siła, ciśnienie, itp.), które mogą być zamienione na przesunięcie proporcjonalne do ich wartości.

W zależności od rodzaju ruchu części dzielimy elementy indukcyjne na:

- elementy o liniowym ruchu ruchomej części obwodu magnetycznego,
- elementy o obrotowym ruchu ruchomej części obwodu magnetycznego.

Ze względu na wykorzystane zasady działania elementy indukcyjne można sklasyfikować następująco:

A. elementy o zmiennej indukcyjności własnej:

- selenoidowe o ruchomym rdzeniu,
- dławikowe o zmiennym oporze magnetycznym,
- dławikowe różnicowe;

B. elementy o zmiennej indukcyjności wzajemnej:

- transformatorowe z ruchomą częścią obwodu magnetycznego,
- transformatorowe różnicowe z ruchomą częścią obwodu magnetycznego,
- wariometryczne – jedno z uzwojeń przesuwa się względem drugiego,
- budowie i działaniu zbliżonym do wirujących maszyn elektrycznych;

C. elementy wykorzystujące powstawanie prądów wirowych.

3.3.1. Elementy indukcyjne o zmiennej indukcyjności własnej

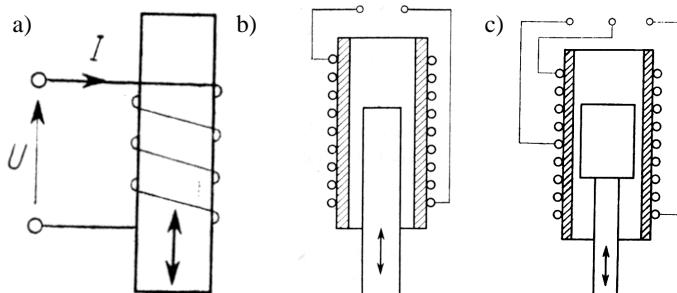
a) Elementy selenoidowe

Impedancja i reaktancja indukcyjna cewki selenoidu zależy od położenia rdzenia:

$$X = f(s) \quad (3.29)$$

gdzie s – wznios rdzenia.

Zasadę działania elementów selenoidowych obrazuje rysunek 3.26a, natomiast na rysunkach 3.26b i 3.26c pokazano schematycznie budowę elementu selenoidowego do pomiaru dużych przesunięć i elementu w wykonaniu różnicowym.



Rys. 3.26. Element selenoidowy: a) zasada działania, b) do pomiaru dużych przesunięć, c) różnicowy [30]

Można to zapisać również w formie rozwiniętej:

$$I = 2\pi f z^2 \Lambda(s) \quad (3.30)$$

gdzie:

- f – częstotliwość napięcia zasilającego,
 z – liczba zwojów,
 s – wznios rdzenia,

$\Lambda(s)$ – przewodność magnetyczna drogi strumienia magnetycznego (zależy od wymiarów selenoidu i kształtu rdzenia).

Pomiar sprowadza się do wyznaczenia reaktancji X lub zależnej od niej impedancji Z :

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (3.31)$$

gdzie: R – czynny opór uzwojenia.

Jako miarę impedancji Z , a zatem reaktancji X oraz R można przyjąć również prąd płynący przez uzwojenie selenoidu, o ile zapewniona zostanie dostateczna stabilizacja wartości skutecznej napięcia zasilającego:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (3.32)$$

gdzie:

U -wartość skuteczna napięcia zasilającego,

I -wartość skuteczna prądu.

Powyższe zależności są zwykle nieliniowymi funkcjami s . Odpowiedni dobór kształtu rdzenia pozwala na zbliżenie tych zależności do liniowych.

b) Elementy dławikowe

Schemat elementu dławikowego przedstawiono na rysunku (3.27). Kotwica (k) porusza się pod wpływem bodźców zewnętrznych i zmienia wielkość szczeliny δ , dzięki czemu zmienia się reaktancja przetwornika:

$$X = 2\pi f z^2 \Lambda(s) \cong 4\pi f z^2 \cdot 10^{-7} \frac{q}{\delta} \quad (3.33)$$

gdzie:

f - częstotliwość napięcia zasilającego,

q - przekrój poprzeczny obwodu magnetycznego,

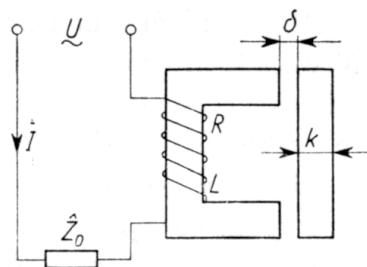
δ - wielkość szczeliny.

Przybliżona postać wzoru jest ważna gdy przekrój magnetyczny jest stały oraz gdy część ferromagnetyczna obwodu magnetycznego nie jest nasycona i jej reluktancja może być pominięta.

Przy szeregowym połączeniu uzwojenia elementu i impedancji Z_0 prąd płynący będzie równy:

$$I = \frac{U}{Z_0 + R + jX} \quad (3.34)$$

Miarą położenia kotwicy (k) mogą być: indukcyjność dławika, natężenie prądu płynącego w jego obwodzie, kąt przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem U i natężeniem prądu I .



Rys. 3.27. Schemat elementu dławikowego [30]

Te stosunkowo proste elementy są jednak, ze względem na swoje wady (duża nieliniowość sygnału, brak fazoczułości względem sygnału wejściowego) oraz potrzebę pokonywania dużych sił do przesuwania części ruchomej obwodu magnetycznego – należy pokonać zarówno ciężar części ruchomej jak i siły przyciągania magnetycznego działające w szczelinie rzadko stosowane.

c) Elementy dławikowe różnicowe

Schemat elementu dławikowego różnicowego i wykres prądów w uzwojeniach przedstawiono na rysunku 3.28. W tych układach siły przyciągania będą się prawie całkowicie równoważyć przy dowolnych wartościach δ . Podczas ruchu do pokonania są jedynie siły tarcia i siły ciężkości. Dla siły równej 0, zwora znajduje się w położeniu środkowym, symetrycznie względem nieruchomych części obwodu magnetycznego. Z tego powodu reluktancja oraz indukcyjność cewek są jednakowe. Pod wpływem działania siły przesuwającej zworę, reluktancje i indukcyjności cewek zmieniają się jednakowo, ale z przeciwnym znakiem.

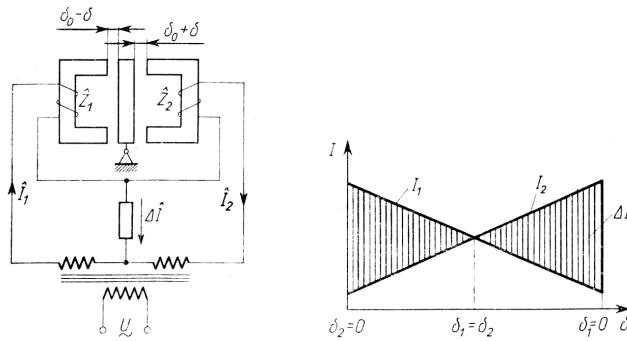
W układzie różnicowym natężenia prądów w uzwojeniach można opisać zależnościami:

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{(\sum R)^2 + \omega^2 \left[L_0 + \frac{kq}{(\delta_0 - \delta)} \right]^2}} \quad (3.35)$$

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{\left(\sum R\right)^2 + \omega^2 \left[L_0 + \frac{kq}{(\delta_0 + \delta)}\right]^2}} \quad (3.36)$$

gdzie:

q – przekrój rdzenia obwodu magnetycznego,
 k – współczynnik proporcjonalności.



Rys. 3.28. Schemat elementu dławikowego różnicowego i wykres prądów w uzwojeniach [30]

Natężenie prądu w gałęzi, w której można umieścić wskaźnik:

$$\Delta I = (I_1 - I_2) \quad (3.37)$$

Napięcie wyjściowe (na przekątnej mostka) wynosi:

$$U_{wy} = k_1 (Z_1 - Z_2) = f(\delta) \quad (3.38)$$

gdzie: k_1 - współczynnik proporcjonalności.

Ważną zaletą elementów różnicowych jest automatyczne kompensowanie się wpływu zewnętrznych czynników zakłócających.

3.3.2. Elementy indukcyjne o zmiennej indukcyjności wzajemnej

a) Elementy transformatorowe

Schematy elementów transformatorowych przedstawiono na rysunku 3.29. Przy ruchu kotwicy zmienia się strumień magnetyczny, który wzbudzony przez uzwojenie pierwotne jest skojarzony z uzwojeniem wtórnym. Siła elektromotoryczna indukcji

wzajemnej w uzwojeniu wtórnym jest funkcją długości szczeliny δ , gdyż przewodność magnetyczna Λ_{12} jest funkcją długości szczeliny:

$$e_2 = -M \frac{di_1}{dt} = -z_1 z_2 \Lambda_{12} \frac{di_1}{dt} \quad (3.39)$$

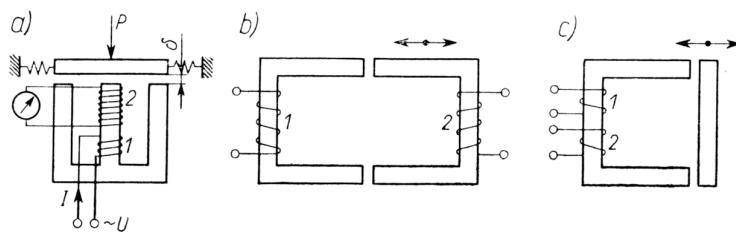
gdzie: M -współczynnik indukcyjności wzajemnej uzwojeń 1 i 2.

Uwzględniając, że strumień:

$$\Phi = \Lambda_{12} \Theta_1 = z_1 I_1 \Lambda_{12} \quad (3.40)$$

otrzymujemy:

$$E_2 = 4,44 f z_1 z_2 I_1 \Lambda_{12} = k \Lambda_{12} \quad (3.41)$$



Rys. 3.29. Schematy elementów transformatorowych [30]

Funkcja $E_2(\delta)$ jest liniowa, gdy funkcja $\Lambda_{12}(\delta)$ jest liniowa. W rozwiązaniach przedstawionych na schematach funkcja ta nie jest liniowa, ale można poprzez odpowiednią konstrukcję i dobór punktu pracy uzyskać stan w którym funkcję $\Lambda_{12}(\delta)$ można z pewnym przybliżeniem uznać za liniową.

Elementy transformatorowe nie są fazoczułe na sygnał wejściowy.

b) Elementy transformatorowe różnicowe

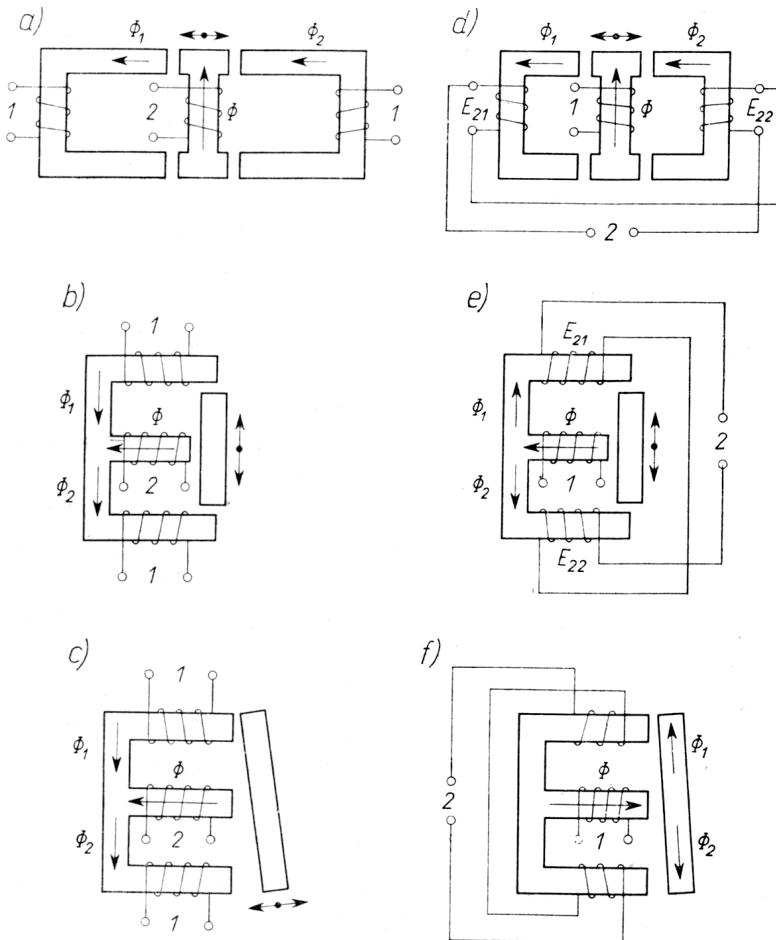
Schematy elementów transformatorowych różnicowych przedstawiono na rysunku 3.30.

Elementy przedstawione schematycznie na rysunkach 3.30.a-c charakteryzują się tym, że mają dwa uzwojenia pierwotne (wzbudzenia), nawinięte na skrajnych kolumnach rdzenia i jedno uzwojenie wtórne nawinięte na kolumnie środkowej.

Przy neutrealnym położeniu kotwicy strumienie wzbudzone przez oba uzwojenia są sobie równe. Stąd strumień magnetyczny kolumny środkowej, który jest różnicą strumieni wzbudzenia, wynosi więc 0, podobnie jak SEM uzwojenia wtórnego.

Gdy kotwica przesuwa się z położenia naturalnego, zostaje zakłócona równowaga strumieni magnetycznych. Wówczas strumień jest różny od zera, a SEM:

$$E_2 = 4,44 f z_1 z_2 I_1 (\Lambda_{121} - \Lambda_{122}) \quad (3.42)$$



Rys. 3.30. Schematy elementów transformatorowych różnicowych;
1-uzwojenia pierwotne, 2-uzwojenia wtórne [30]

Dla elementów, które mają jedno uzwojenie pierwotne i dwa uzwojenia wtórne połączone przeciwsobnie tego rodzaju (rysunki 3.30.d-f), w neutrealnym położeniu kotwicy:

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{1}{2} \Phi \quad (3.43)$$

więc:

$$E_{21} = E_{12} = k_1 A_{12,0} \quad (3.44)$$

gdzie: $A_{12,0}$ - przewodność magnetyczna drogi strumienia magnetycznego w położeniu neutrealnym kotwicy.

Ze schematu połączenia wynika:

$$E_2 = E_{21} - E_{22} = 0 \quad (3.45)$$

Przesunięcie kotwicy z położenia neutralnego powoduje zakłócenie rozprływu strumieni, jeden rośnie a drugi maleje i wówczas E_2 jest różne od zera.

Stąd wynika podstawowa zaleta elementów różnicowych – ich fazoczułość względem sygnału wejściowego, dzięki czemu element pozwala rozróżnić kierunek ruchu kotwicy.

b) Elementy wariometryczne

Schemat elektryczny elementu wariometrycznego przedstawiono na rysunku 3.31. Dwa uzwojenia (np. nawinięte na rdzeniach toroidalnych) mogą zmieniać położenie względem siebie. Jeżeli zaciski a, b, które są końcówkami jednego z uzwojeń, zasilimy napięciem sinusoidalnie zmiennym, to w drugim uzwojeniu zostanie wyindukowana SEM, której wartość mierzona na zaciskach c, d, można opisać następująco:

$$e_{cd} = M \frac{di_1}{dt} \quad (3.46)$$

gdzie:

i_1 - prąd w uzwojeniu pierwszym,

M - współczynnik indukcyjności wzajemnej.

Współczynnik indukcyjności wzajemnej:

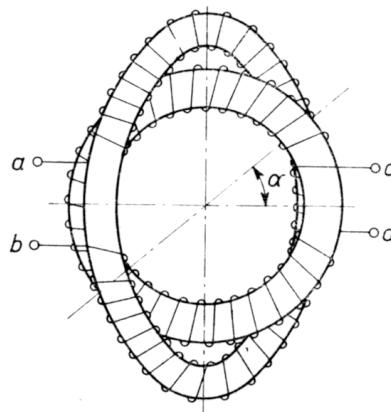
$$M = k \sqrt{L_1 L_2} \quad (3.47)$$

gdzie:

L_1, L_2 - indukcyjności obu uzwojeń,

k - współczynnik liczbowy (z zakresu 0-1).

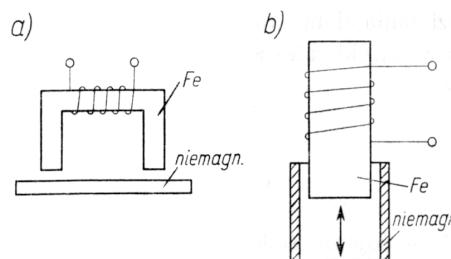
Wartość współczynnika k jest funkcją wzajemnego położenia uzwojeń i wynosi: 1 - gdy płaszczyzny obu uzwojeń pokrywają się i 0 - gdy płaszczyzny obu uzwojeń są do siebie prostopadłe.



Rys. 3.31. Schemat elektryczny elementu wariometrycznego [30]

3.3.3. Elementy indukcyjne wykorzystujące prądy wirowe

Schemat elementów wykorzystujących prądy wirowe przedstawiono na rysunku 3.32. Element taki składa się z uzwojenia nawiniętego na rdzeń ferromagnetyczny i części metalowej niemagnetycznej.



Rys. 3.32. Schematy elementów wykorzystujących prądy wirowe [30]

Jeżeli w uzwojeniu płynie prąd przemienny i część niemagnetyczna znajduje się w polu magnetycznym wzbudzonym przez część ferromagnetyczną, to indukują się w niej prądy wirowe, których natężenie jest zależne od grubości części niemagnetycznej oraz strumienia magnetycznego obejmowanego przez ich obwód. Jeżeli obie części zmienią wzajemne położenie, lub zmianie ulegnie grubość części niemagnetycznej, wpłynie to na zmianę natężenia prądów wirowych, a to z kolei wpłynie na zmianę impedancji mierzonej na zaciskach uzwojenia. Gdy uzwojenie zasilane jest ze źródła napięcia zmiennego o stałej amplitudzie i częstotliwości, miarą grubości części niemagnetycznej lub jej przesunięcia względem części ferromagnetycznej będzie prąd w obwodzie uzwojenia.

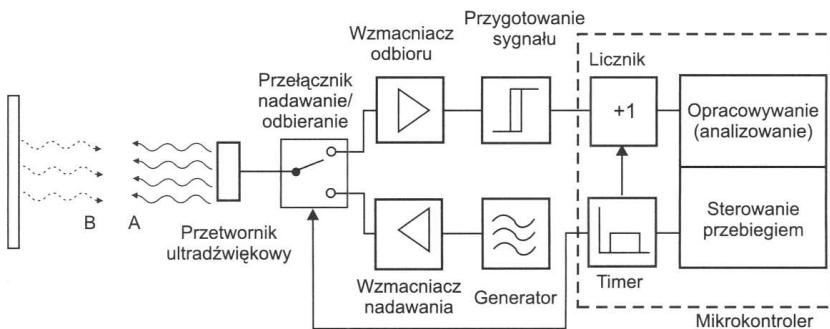
Czujniki takie są stosowane do pomiaru grubości elementów z metali diamagnetycznych (np.: ołów, miedź, aluminium, srebro), przesunięć tych elementów, a także grubości powłok.

3.4. Przetworniki ultradźwiękowe

Ultradźwiękami nazywamy drgania o częstotliwości wyższej od górnej granicy słyszalności ucha ludzkiego tj. od około 16 kHz i niższej od 10 GHz. Fale ultradźwiękowe, o częstotliwościach do $6 \cdot 10^5$ Hz, mogą rozchodzić się w ośrodkach stałych, ciekłych i gazowych. Wykazują one typowe własności falowe: uginają się wokół przeszkód znajdujących się na ich drodze, załamują się i odbijają na granicy dwóch ośrodków; można je też skupiać w wąskie wiązki. Najczęściej wykorzystywane są ultradźwięki rozchodzące się w postaci fal podłużnych. W tym ruchu cząstki ośrodka pobudzane są do drgań o kierunku zgodnym z kierunkiem rozchodzenia się fali. Występuje wówczas na przemian zagęszczanie i rozrzedzanie cząstek ośrodka. Drgania o częstotliwości ultradźwiękowej wytwarzają się za pomocą przetworników, które umożliwiają przetwarzanie energii elektrycznej na mechaniczną i na odwrót. Źródło fal ultradźwiękowych stanowi zwykle element lub układ drgający, który jest pobudzany do drgań za pomocą zmiennego pola magnetycznego, elektrycznego lub elektromagnetycznego. Jako przetworniki ultradźwiękowe stosuje się elementy piezoelektryczne, najczęściej kwarcowe. Częstotliwość napięcia wywołującego drgania powinna być zgodna z częstotliwością drgań własnych przetwornika. Częstotliwości podstawowe przetworników piezoelektrycznych kwarcowych wynoszą od 50 do 200 kHz, a mikromechanicznych krzemowych (elementy MEMS) do 5 MHz. Elementy drgające mogą być naklejane na membrany wykonane z aluminium. Po przyłożeniu zmiennego napięcia piezoelementy drgają odkształcając membranę. Przez krótkotrwałe pobudzenie membrany do drgań wysokoczęstotliwościowych powstaje impuls nadawczy, składający się z sekwencji drgań. Jeżeli impuls ten, przemieszczając się w ośrodku z prędkością dźwięku, natrafi na przeszkodę w postaci obiektu o innej gęstości, to odbija się, przynajmniej częściowo, od niego i wraca do przetwornika w postaci impulsu echa. Ponieważ efekt piezoelektryczny jest odwracalny, ten sam element przetwornika daje się zastosować zarówno do wysyłania, jak i do odbierania impulsów.

Zasadę działania czujnika ultradźwiękowego wraz z układem przetwarzania przedstawiono na rysunku 3.33. Jednostka sterująca włącza przetwornik krótkotrwałym nadawaniem fal ultradźwiękowych (przez około 300 μ s) i uruchamia jednocześnie pomiar czasu (na przykład przez zliczanie impulsów z generatora częstotliwości wzorcowej). Natychmiast po wysłaniu sekwencji drgań następuje okres wygaszania - uspokojenia membrany, trwający około 900 μ s. W tym czasie odbiór sygnału nie jest możliwy. Po tym okresie układ pomiarowy jest przełączany na odbiór, a sygnał

akustyczny powracający w postaci echo jest odbierany. Odebrane echo przebiega przez wzmacniacz i układ przygotowania sygnału. Ten ostatni składa się co najmniej z filtra pasmowego (ochrona przed błędymi pomiarami wskutek obcego dźwięku) dopasowanego do częstotliwości nadawania i wyzwalacza. Sygnał wyjściowy wyzwalacza („echo odebrane”) zatrzymuje zliczanie impulsów pomiaru czasu. Następnie liczba impulsów jest odczytywana i obrabiana.



Rys. 3.33. Schemat czujnika ultradźwiękowego i układu przetwarzania sygnału A - impuls nadawczy, B - impuls odbiorczy, odbity od przeszkody [8]

Znając częstotliwość i długość fali można obliczyć prędkość sygnału w danym ośrodku, natomiast mierząc czas od momentu wysłania sygnału do odebrania echo można obliczyć odległość czujnika od przeszkody.

Obszar, w którym rozchodzą się fale ultradźwiękowe nazywa się polem ultradźwiękowym. Kształt tego pola jest zależny od postaci i wymiarów przetwornika wysyłającego fale oraz długości fali rozchodzącej się w ośrodku, a jego natężenie od wysyłanej energii, powierzchni fali i czasu, w którym fala przepływa.

W zależności od celu stosowania, czujniki ultradźwiękowe mogą służyć do wykrywania przemieszczających się elementów i np. zliczania ich ilości (tzw. czujniki zbliżeniowe), lub do pomiarów odległości w zakresie od kilku cm do kilkunastu m. Ich niepewność pomiarowa wynosi do 0,05%. Dobór czujnika do określonego celu powinien uwzględnić obszar, jaki ma być pokryty przez sygnał z przetwornika oraz odległość, na jaką ma docierać.

Jako materiał przetwornika stosuje się materiały piezoelektryczne z kwarcu, siarczanu litu lub tytanianu baru. Istnieją też przetworniki na bazie piezoelektrycznych polimerów (PVDF).

Stosowanie czujników ultradźwiękowych wymaga analizy wpływu różnych czynników zewnętrznych na wynik pomiaru:

- Wpływ parametrów otoczenia: Prędkość rozprzestrzeniania się fali w powietrzu zależy od jego temperatury, wilgotności i ciśnienia. Wpływ temperatury powinien być uwzględniony w przypadku pomiarów odległości. W przypadkach znacznej zmienności temperatury ośrodka, w którym

przeprowadza się pomiary, układ czujnika ultradźwiękowego wyposażony jest w czujnik temperatury.

- Wpływ częstotliwości: Podczas wyboru częstotliwości wzbudzenia przetwornika konieczny jest kompromis między rozdzielczością pomiaru a pochłanianiem dźwięku. Wysokie częstotliwości pozwalają na wyższą rozdzielcość. Ze wzrostem częstotliwości rośnie jednak pochłanianie dźwięku w ośrodku, w którym dźwięk się rozprzestrzenia.
- Wpływ właściwości materiałowych i geometrii nadajnika fal: Jeżeli fala ultradźwiękowa pada na granicę ośrodka, to część dźwięku wchodzi do przylegającego ośrodka (podlega transmisji), część zaś jest odbijana (podlega odbiciu). W materiałach o niewielkiej gęstości (tworzywa piankowe, tekstylia, itp.) występuje duże pochłanianie dźwięku (przetwarzanie w ciepło) z powodu ich struktury powierzchni. Odbijana jest tylko niewielka część energii. Dlatego są one trudne do wykrycia, a do ich identyfikacji potrzebne są przetworniki o dużej energii promieniowania. Także niektóre gazy (np. CO₂) mają właściwości silnego pochłaniania dźwięku. Dlatego czujniki ultradźwiękowe nadają się głównie do analizy położenia lub prędkości obiektów o dużej gęstości.

3.5. Przetworniki optoelektroniczne

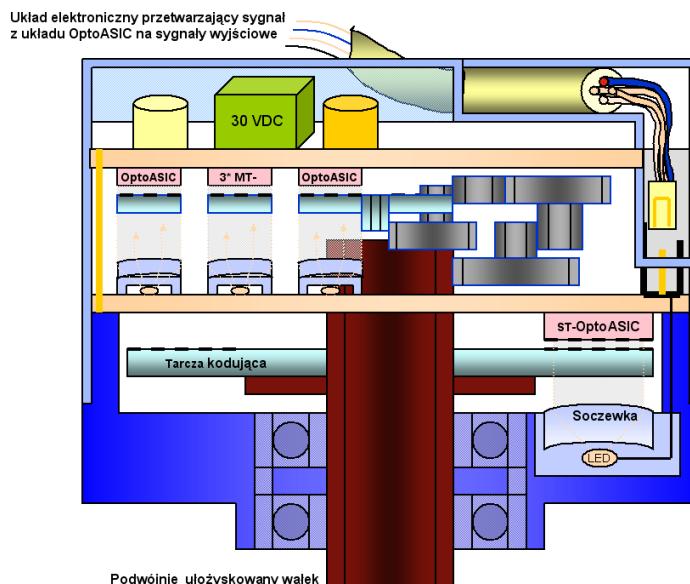
Rozróżniane są dwa rodzaje przetworników optoelektronicznych: przetworniki obrotowo-impulsowe do rozróżniania kierunku i odległości względnej oraz przetworniki kodowe do rozpoznawania pozycji bezwzględnej. Przetworniki te, zwane też enkoderami, są oferowane w szerokim zakresie rozdzielczości, liczby kanałów, wykonaniach elektroniki, sygnałów wyjściowych, ze złączem lub kablem, a także z różnymi sposobami mocowania do elementów ruchomych.

3.5.1. Budowa przetworników optoelektronicznych

Budowę przetwornika optoelektronicznego przedstawiono na rysunku 3.34. Przetworniki te należą do grupy przetworników zintegrowanych. Elementy ruchome, które wiążane z obiektem mierzonym, są ułożyskowane w obudowie.

Rzdzielcość przetworników jest określona przez tarczę podziałową. Tarcza jest w zależności od rozdzielczości przetwornika podzielona na określoną liczbę pól ciemnych i jasnych, która przemieszcza się kątowo nad podziałką maskującą. Tarcza maskująca jest oświetlana diodą IRED. Element światłoczuły odbiera z tarczy podziałowej impulsy świetlne i przetwarza je na sygnały elektryczne. Do obróbki sygnałów wykorzystuje się specjalizowane układy scalone OptoASIC, odpowiedzialne za wzmacnianie, filtrację i kształtowanie sygnałów wyjściowych. Poziom sygnałów

zależy od następującej po fotoelementach elektronice formującej impulsy wyjściowe. Ta elektronika jest najczęściej zintegrowana w przetworniku, może być jednak dostępna również na zewnątrz. Cyfrowy sygnał wyjściowy jest w postaci ciągu impulsów prostokątnych (np.: TTL) dla przetworników obrotowo-impulsowych lub też słów wielobitowych dla przetworników obrotowo-kodowych. Od strony mechanicznej, a właściwie sposobu montażu na obiekcie badanym, oferowane są różne wersje przetworników (rys. 3.35). Należy tutaj również dodać, że mocowanie enkodera powinno zapewniać przenoszenie tylko momentu obrotowego wynikającego z oporów łożyskowania enkodera – zminimalizować należy zwłaszcza siły promieniowe, które przyczyniają się do szybkiego zużywania się łożysk przetwornika.

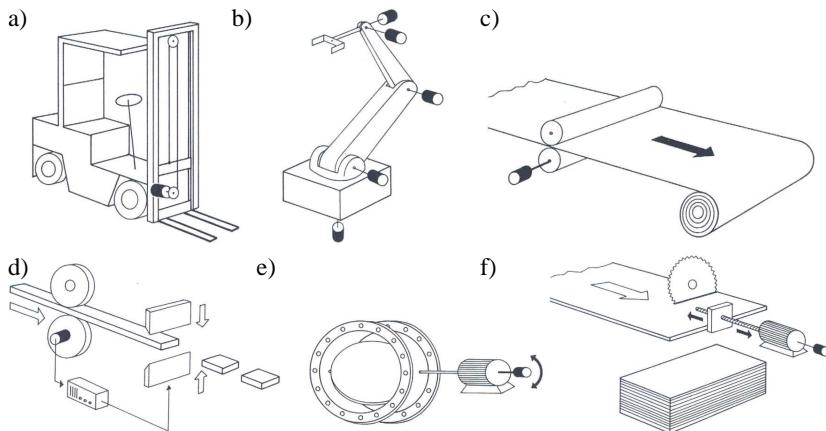


Rys. 3.34. Budowa przetwornika obrotowo-impulsowego [15]



Rys. 3.35. Różne sposoby aplikacji przetworników optoelektronicznych [17]

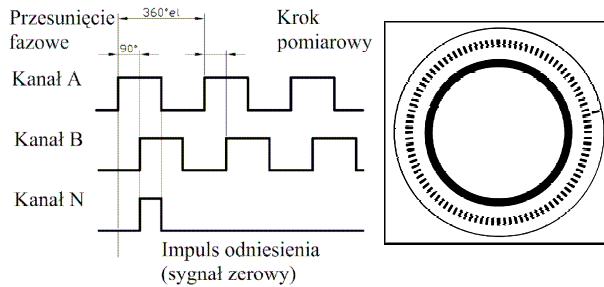
Przykłady aplikacji przetworników optoelektronicznych przedstawiono na rysunku 3.36.



Rys. 3.36. Przykłady aplikacji przetworników optoelektronicznych: a) detekcja położenia wideł wózka widłowego, b) sterowanie wieloosiowe w robotach, c) pomiar długości taśmy, d) pomiar długości za pomocą koła, e) kontrola ustawienia zaworów, f) ustawianie z ogranicznikiem ruchu [15]

3.5.2. Przetworniki obrotowo-impulsowe

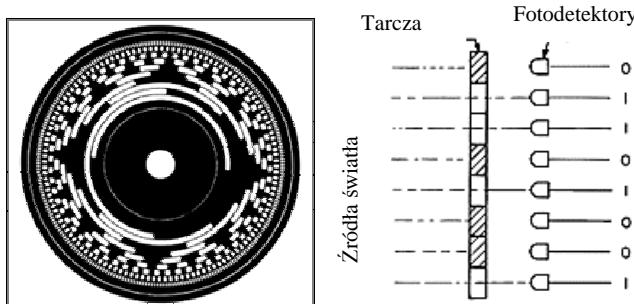
Przetworniki obrotowo-impulsowe są przeznaczone do pomiaru przemieszczeń kątowych, a więc zarówno do pomiaru kąta jak i prędkości kątowych. Z pomocą napędu paskowego lub zębatki, względnie koła cienkiego mogą być mierzone również przemieszczenia liniowe (rys. 3.36). Przetworniki te pozwalają na określenie pozycji względnej przez zliczanie impulsów. Poza tym, może być rozpoznawany kierunek ruchu dzięki przesunięciu fazowemu kanałów A i B (rys. 3.37) tak, że elektronika współpracująca musi przychodzące impulsy dodawać lub odejmować (układ z kwadraturą). Kanał zerowy C (N) oznacza przy każdym obrocie pozycję absolutną, która może służyć do rozpoznawania poprawności przychodzących impulsów i wyznaczania pozycji zerowej. Rozdzielcość określana jest przez liczbę kresek (działek) na tarczy podziałowej przetwornika (rys. 3.37), co odpowiada liczbie okresów z jednego kanału. Liczba impulsów zliczana w poprawnym liczniku kwadraturowym jest 4-krotnie większa od liczby działek. Elementy fotoelektryczne dostarczają przebiegi sinusoidalne. Sygnały te mogą być dostępne w zależności od typu przetwornika bezpośrednio na wyjściu. W zależności od przyłączonych do nich układów dyskryminacyjnych Schmitta przekształca się sygnał sinusoidalny na prostokątny.



Rys. 3.37. Przetworniki obrotowo-impulsowe: sygnały wyjściowe i tarcza podziałowa [9]

3.5.3. Przetworniki obrotowo-kodowe

W przetwornikach kodowych pozycja kątowa jest zawarta jako cyfrowa informacja na tarczy podziałowej przetwornika (rys. 3.38). Dzięki temu informacja ta jest natychmiast do dyspozycji jako słowo kodowe zaraz po włączeniu lub po przerwie w zasilaniu, względnie również po przekroczeniu częstotliwości granicznej. Tarcza podziałowa posiada większą liczbę ścieżek, tak że każdy fotoelement jest przyporządkowany do swojej ścieżki (rys. 3.38). Wartości są digitalizowane i mogą być dostępne jako słowo kodowe na wyjściu. Najczęściej do kodowania używany jest kod GREY`a zamieniający wartość tylko na jednym bicie o jedną pozycję w każdym kroku pomiarowym. Dzięki temu łatwo można kontrolować poprawność kodu przy przenoszeniu informacji. Popularne są również: kod binarny i kod BCD.



Rys. 3.38. Przetwornik obrotowo-kodowy: a) tarcza podziałowa, b) budowa słowa kodowego [15]

3.5.4. Układy elektroniczne w przetwornikach optoelektronicznych

Poziom sygnałów wyjściowych jest określony przez elektronikę opracowującą wyjście. W standardowym układzie wyjściowym tranzystorowym poziomy sygnałów zależą od napięcia zasilania przetwornika. To wyjście zawiera z reguły tranzystor pull up podwieszony do napięcia zasilania i jest odpowiedni dla długości kabla około 6 m. W niektórych przetwornikach standardowe wyjście jest zabezpieczone przed

przepolaryzowaniem. Wyjście typu otwarty kolektor (ang. open collector) jest wyjściem standardowym, ale powinien być zastosowany zewnętrznie rezistor polaryzujący do napięcia zasilania. Dla długości połączeń rzędu 100 m i częstotliwości rzędu 100 kHz najbardziej odpowiednie są wyjścia typu nadajnik linii. Poziomy sygnałów są kompatybilne z poziomem CMOS lub kompatybilne z poziomami TTL. W opcji typu nadajnik linii dostępne są kanały A, B, C oraz ich negacje.

3.5.5. Podłączanie przetworników optoelektronicznych do układów zewnętrznych

Dla prostych zadań pomiarowych, w których nie jest wymagana duża prędkość obróbki i w których nie musza być pokonane duże odległości, przetwornik impulsowy może być podłączony wprost do sterownika programowanego logicznie (np.: PLC), tylko jeśli taki sterownik zawiera liczniki rewersywne. Przy tym przetwornik musi być zasilony z zewnętrznego napięcia zasilania, które będzie oddzielone galwanicznie od układu PLC. Zwykłe sterowniki PLC wymagają na wejściu sygnałów 24 V, tak że powinien być zastosowany przetwornik z wyjściem typu push-pull. Częstotliwość graniczna sterownika PLC nie przekracza zwykle 500 Hz. Liczniki opracowują częstotliwości od około 50 kHz przy poziomie 24 V do 500 kHz przy poziomie TTL bez wpływu na pracę jednostki centralnej sterownika. Ażeby podnieść odporność na zakłócenia zalecane jest stosowanie w przetwornikach impulsowych wyjścia typu nadajnik linii. Występują tutaj obok sygnałów A, B i C ich negacje (/A, /B, /C) dzięki temu realizowane są długości przewodów do 100 m przy częstotliwości 100 kHz. Stosowanie specjalnie do tego przystosowanych układów scalonych (np.: typu LS7082/3/4) ułatwia podłączenie przetworników do liczników zewnętrznych.

3.6. Czujniki fotooptyczne

Światło jako medium stosowane jest w wielu dziedzinach techniki i codziennego życia w układach sterowania i regulacji. Ocenia się przy tym zmianę intensywności strumienia światelnego na jego drodze optycznej (między nadajnikiem i odbiornikiem), która to zmiana wywołana jest obecnością kontrolowanego obiektu. W zależności od obecności tego obiektu na ścieżce optycznej strumień światła zostaje przerwany, odbity albo rozproszony.

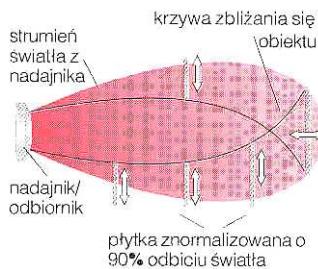
Jako nadajnik stosowane są zazwyczaj synchroniczne diody pracujące w podczerwieni, a jako odbiorniki stosowane są fototranzystory. Chętnie wykorzystywane jest również światło lasera.

Sygnal wyjściowy jest w dużej mierze niezależny od oświetlenia zewnętrznego ponieważ światło widzialne łatwo odfiltrować.

W trudnych warunkach chętnie stosuje się czujniki odbiciowe lub bariery świetlne pracujące z światłem czerwonym, emitowanym przez diodę świetlną, ponieważ łatwo zauważać taki strumień światła i punkt, na który pada (łatwe do wyregulowania).

3.6.1. Czujniki odbiciowe

Czujniki odbiciowe (rys. 3.39) mają nadajnik i odbiornik we wspólnej obudowie. Sposób wycelowania na obiekt jest w dużej mierze nie istotny, istotna jest natomiast powierzchnia, od której odbija się światło, gdyż wymaga to wprowadzania korekt (tab. 3.2).



Rys. 3.39. Zasada działania czujnika odbiciowego [15]

Obiekt obserwowany (np. płytka znaleziona o 90% odbiciu) umieszczona w obszarze padania strumienia światła odbija od swej powierzchni część światła, która wraca do odbiornika. Gdy znaleziona płytka zbliży się do krzywej następuje przełączenie i zmiana sygnału wyjściowego.

Tabela 3.2. Współczynniki korekcyjne dla różnych powierzchni [15]

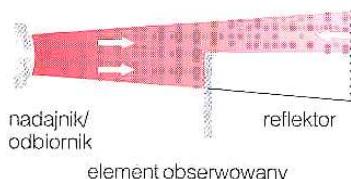
Współczynnik korekcyjny [-]	Powierzchnia elementu obserwowanego
1	Papier biały, matowy, 200 g/m^2
1,2 – 1,6	Metal błyszczący
1,2 – 1,8	Aluminium anodowane na czarno
1	Styropian biały
0,6	Bawełna biała
0,5	PCW szare
0,4	Drewno surowe
0,3	Karton czarny, błyszczący
0,1	Karton czarny, matowy

Zasięg czujników odbiciowych zależy od wielkości, postaci, barwy i własności powierzchni odbijających światło. Standardowe czujniki odbiciowe mogą uzyskać odległość 2 m.

3.6.2. Czujniki refleksyjne

Czujniki refleksyjne (rys. 3.40) mają nadajnik i odbiornik we wspólnej obudowie. Reflektor, który znajduje się na przeciwnie stronie drogi światła, odbija strumień światła pochodzący z nadajnika, kierując go do odbiornika. Obiekt obserwowany przerywa strumień światła odbitego i wywołuje zmianę sygnału wyjściowego. Przy powierzchniach lustrzanych zaleca się aby światło odbite przed wejściem do układu odbiornika przepuścić przez filtr polaryzacyjny, żeby uniknąć ewentualnych zakłóceń od innych sygnałów.

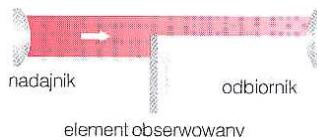
Zasięg działania standardowych czujników refleksyjnych osiąga 8 m.



Rys. 3.40. Zasada działania czujnika refleksyjnego [15]

3.6.3. Bariery świetlne jednokierunkowe

Bariera świetlna jednokierunkowa (rys. 3.41) składa się z oddzielnego nadajnika i oddzielnego odbiornika, które muszą być rozmieszczone po obydwu stronach ścieżki światła.



Rys. 3.41. Zasada działania bariery świetlnej jednokierunkowej [15]

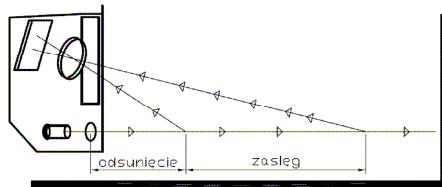
Element obserwowany przerywa strumień światła i oddziałuje na odbiornik niezależnie od właściwości swojej powierzchni - powodując przełączenie, to znaczy zmianę sygnału wyjściowego. Przy niekorzystnych warunkach (np. zapalenie, mgła, olej) tego typu bariery dają najlepsze efekty.

Zasięg tego typu czujników może sięgać do kilkudziesięciu metrów.

3.6.4. Laserowe czujniki odległości

Najczęściej w laserowych czujnikach odległości wykorzystuje się triangulacyjną metodę pomiaru (rys. 3.42). Wiązka laserowa jest generowana przez nadajnik

a następnie po odbiciu od obiektu wraca do odbiornika poprzez układ optyczny. Odbiornik ma postać linijki fototranzystorowej. W tego typu czujnikach sygnał wyjściowy generowany jest na podstawie miejsca padania wiązki odbitej na odbiornik. Dokładność pomiaru jest związana z zakresem pomiarowym i w precyzyjnych czujnikach może osiągać pojedyncze mikrometry.



Rys. 3.42. Laserowy czujnik odległości [15]

3.6.5. Czujniki kontrastu

Czujniki kontrastu przeznaczone są do wykrywania różnicy odcieni (np. ciemniejszych znaczników na jaśniejszym tle). Wyjście czujnika zmienia swój stan gdy obiekt jest ciemniejszy od zaprogramowanego. Jako nadajnik stosuje się fotodiódę czerwoną, zieloną lub białą o szerokim spektrum emisji.

Zdolność wykrywania kontrastu jest związana z kolorem obiektów. Dlatego np. do wykrywania kontrastu obiektów w odcieniach czerwieni nie powinno się stosować światła czerwonego

3.6.6. Czujniki koloru

Zadaniem czujników koloru jest rozpoznawanie konkretnej barwy lub barw (w wypadku czujników wielokanałowych). Czujnik „uczony” jest określonego koloru i następnie w normalnym trybie pracy porównuje obserwowaną barwę z zapamiętanym wzorcem. Gdy wynik jest pozytywny aktywowane jest wyjście czujnika. Starsze wersje czujników posiadają trzy diody emitujące światło czerwone, zielone i niebieskie oraz jeden odbiornik (rys. 3.43). Nowe wersje czujników posiadają jedną białą diodę o szerokim spektrum emisji, oraz trzy zintegrowane detektory składowych RGB (rys 3.43).



Rys. 3.43. Czujnik koloru: z trzema fotodiodami i odbiornikiem, z jedną diodą białą [15]

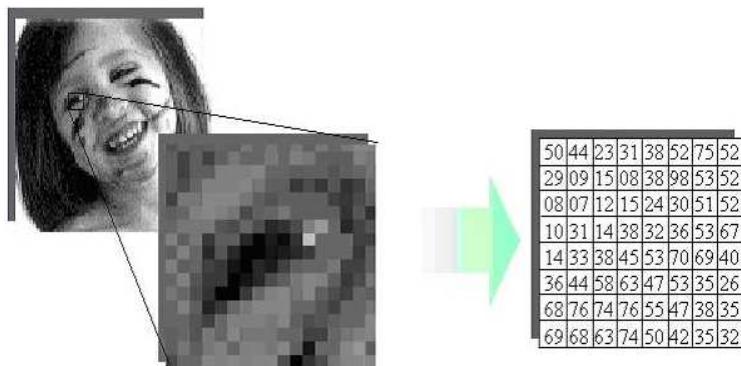
3.6.6. Czujniki wizyjne

Czujniki wizyjne służą do rejestracji obrazu, który jest następnie przetwarzany przez dedykowane urządzenie lub program komputerowy. Do rejestracji obrazu używane są różne przetworniki, dość popularne są matryce CCD, stosowane powszechnie w urządzeniach codziennego użytku (np.: aparaty fotograficzne, skanery). Rozdzielcość matrycy decyduje o dokładności odwzorowania obserwowanego obiektu. Ogromny wpływ na pracę przetworników wizyjnych ma sposób oświetlenia obserwowanego obiektu. Na rysunku 3.44 przedstawiono czujnik wizyjny wyposażony we własne źródło światła.



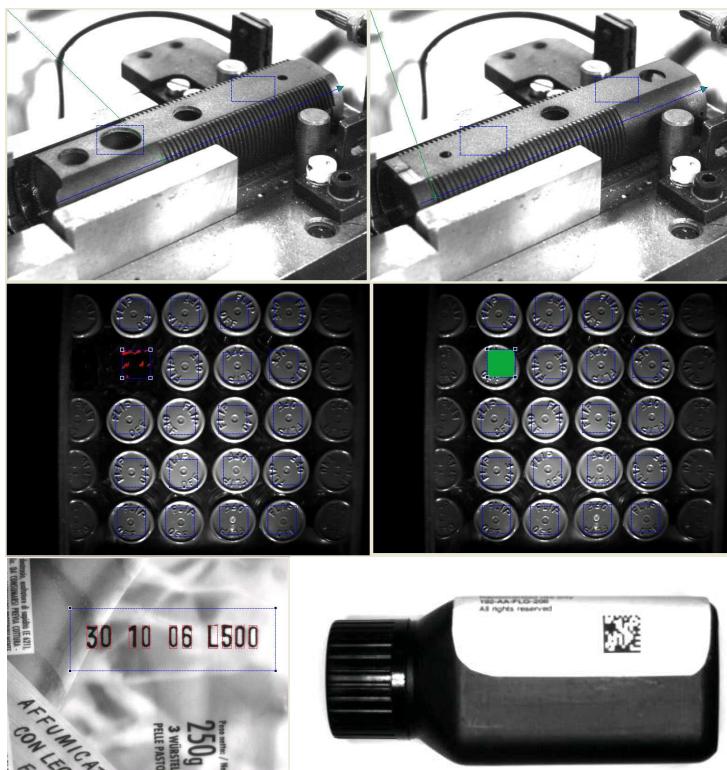
Rys. 3.44. Czujnik wizyjny [15]

W zależności od obszaru zastosowań używa się matryc umożliwiających rejestrację obrazu w kolorze lub odcieniach szarości (rys. 3.45).



Rys. 3.45. Kodowanie wycinka obrazu w odcieniach szarości [15]

Czujniki wizyjne są wykorzystywane do rozpoznawania obecności obiektów, poprawności ich kształtu lub montażu zespołów, jakości powierzchni, odczytu etykiet, np.: kodów kreskowych, kodów 2D (Datamatrix) lub znaków alfanumerycznych, z wykorzystaniem programów do rozpoznawania tekstu OCR (rys. 3.46).



Rys. 3.46. Zastosowanie czujników wizyjnych: a) weryfikacja poprawności wykonania półprodukту, b) kontrola obecności obiektów, c) rozpoznawanie znaków alfanumerycznych (OCR/OCV), d) czytnik kodów kreskowych i kodów 2d (Datamatrix) [15]

3.7. Termoelementy

Elementy te wykorzystują tzw. zjawisko termoelektryczne. Polega ono na powstawaniu w zamkniętym obwodzie złożonym z dwóch różnych metali A i B (rys. 3.47) siły elektromotorycznej, której wielkość zależy od różnicy temperatur spoin metali A i B. W obwodzie termoelektrycznym występują dwa rodzaje sił elektromotorycznych: siła elektromotoryczna Peltiera (E_p) – ma źródło w kontaktowej różnicy potencjału na styku metali A i B; siła elektromotoryczna Thomsona (E_T) – powstaje w zamkniętym obwodzie złożonym z różnych metali.

Obie siły zależą od temperatur spoin T_1 i T_2 i są nierozdzielne. Wypadkowa siła elektromotoryczna:

$$E = E_p + E_T = \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \ln \left(\frac{n_A}{n_B} \right) + (\sigma_A - \sigma_B)(T_1 - T_2) \quad (3.48)$$

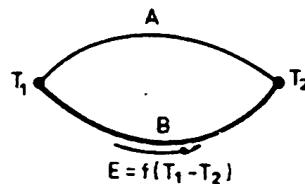
gdzie:

k – stała Boltzmana,

e – ładunek elektronu,

n_A, n_B – liczba elektronów swobodnych na 1 cm^3 metali A i B,

σ_A, σ_B – współczynnik Thomsona dla metali A i B.



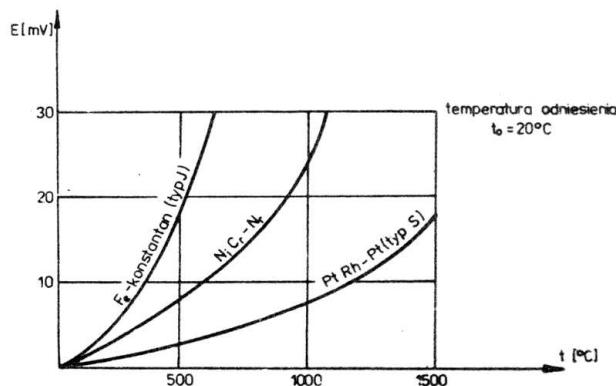
Rys. 3.47. Obwód termoelektryczny złożony z dwóch metali [51]

Z powyższej definicji wynika potrzeba stosowania układu dwóch różnych metali do pomiaru różnicy temperatur. Taki układ nazywa się termoelementem. Spoina znajdująca się w mierzonej temperaturze nosi nazwę spoiny pomiarowej, druga natomiast – spoiny odniesienia.

Metalom i stopom, które stosuje się do budowy termoelementów, stawia się duże wymagania tak, aby termoelement mógł cechować się następującymi zaletami:

- liniowość,
- powtarzalność i stałość charakterystyki $E=f(T_1-T_2)$,
- duża czułość, definiowana jako $\Delta E/\Delta T$,
- odporność na wpływy występujące w przemyśle,
- niski koszt.

Zakres temperatur w zastosowaniach przemysłowych: -200°C - 1600°C . Znacznie wyższe i niższe temperatury mierzy się przy pomocy termoelementów specjalnych. W tabeli 3.3 przedstawiono właściwości wybranych termoelementów, a na rysunku 3.48 przedstawiono charakterystyki statyczne kilku popularnych termoelementów.

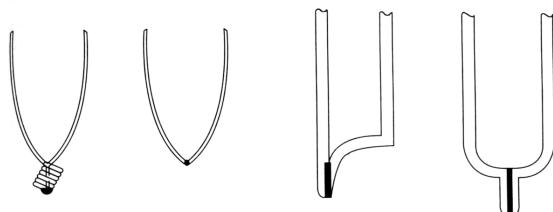


Rys. 3.48. Charakterystyki statyczne wybranych termoelementów [51]

Tab. 3.3. Właściwości wybranych temoelementów [51]

Nazwa i skład ramion		Czułość [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$] w temperaturze		Temperatura dopuszczalna [$^\circ\text{C}$]		Uwagi (oznaczenie termoelementu)
+	-	0°C	800°C	stała	chwilowa	
Platyna 90%-rod 10%	Platyna	5,6	10,9	1300	1600	Wzorcowy i kontrolny dla wyższych temperatur (S)
Chromel	Alumel Ni 94%, Mn 3%, Al 2%, Si 1%	39,5	40,5	1200	1350	Najbardziej uniwersalny termometr przemysłowy (K)
Nikiel 90%, chrom 10%	Nikiel	39,5	40,5	1000	1200	Uniwersalny termometr przemysłowy
Żelazo	Konstantan Cu 60%, Ni 40%	52	65	600	900	Korzystny i stabilny dla średnich temperatur (J)
Miedź	Konstantan Cu 60%, Ni 40%	38,5	61,7	300	400	Korzystny dla niskich temperatur (T)

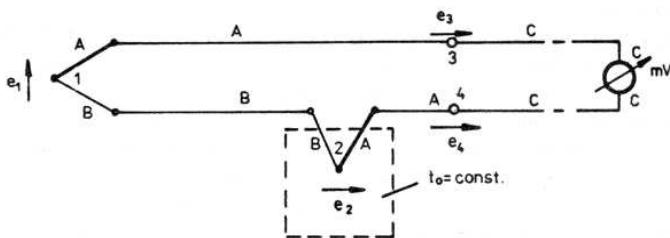
Połączenie końców, a więc spoiny, mogą być wykonywane w różny sposób (rys. 3.49), ale muszą w sposób trwały zamykać obwód.



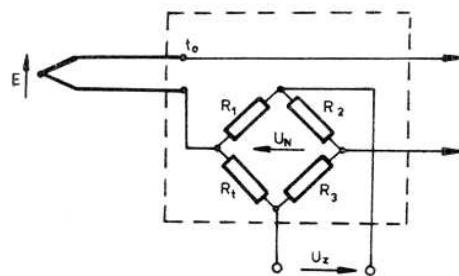
Rys. 3.49. Sposoby wykonania spoin [36]

Na rysunkach 3.50 i 3.51 przedstawiono układy do pomiaru temperatury z wykorzystaniem temoelementów. Zasadnicze znaczenie ma kompensacja wpływu zmian temperatury spoiny odniesienia lub też zapewnienie stałej temperatury tej spoiny.

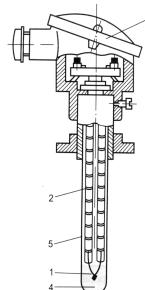
Termoelementy wymagają ochrony przed mechanicznymi i chemicznymi oddziaływaniami (rys. 3.52, 3.53). Osłony mają zapewnić odporność na mierzone temperatury i agresywność chemiczną, szczelność, wytrzymałość mechaniczną, izolację elektryczną.



Rys. 3.50. Układ do kompensacji wpływu zmian temperatury spoiny odniesienia z dodatkowym termoelementem, A-material dodatniego ramienia termopary, B- materiał ujemnego ramienia termopary, C-materiał doprowadzeń [51]



Rys. 3.51. Układ do kompensacji wpływu zmian temperatury złącza odniesienia [51]



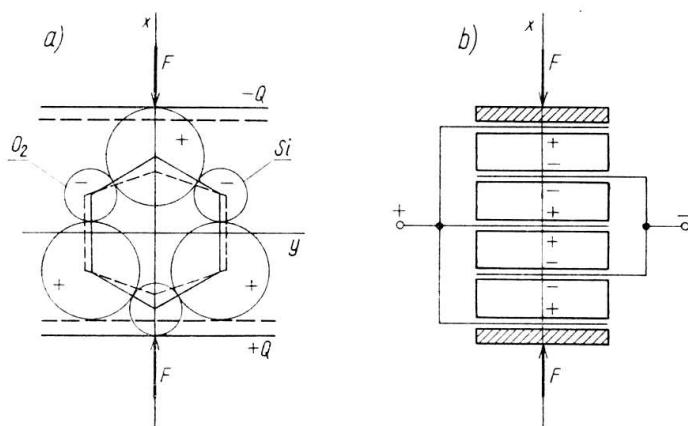
Rys. 3.52. Budowa czujnika: 1-termoelement, 2-osłona (np. ceramiczna), 3-główica, 4-materiał izolacyjny, 5-osłona metalowa) [36]



Rys. 3.53. Przemysłowe obudowy do czujników temperatury [19]

3.8. Przetworniki piezoelektryczne

Niektóre kryształy (kwarc, tytanian baru) są spolaryzowane elektrycznie. Ciśnienie wywierane na kryształ piezoelektryczny, pracujący w zakresie sprężystości, skierowane równolegle do jego osi elektrycznej lub mechanicznej, powoduje powstanie ładunku elektrycznego na ściankach prostopadłych do osi elektrycznej. W budowie przetworników wykorzystuje się tak zwany efekt piezoelektryczny wzdużny – ładunki powstają na powierzchniach przyłożenia siły (rys. 3.54) oraz tak zwany efekt piezoelektryczny poprzeczny – ładunki powstają na powierzchniach bocznych (rys. 3.55).



Rys. 3.54. Zasada działania i budowy kwarcowych przetworników piezoelektrycznych z wykorzystaniem efektu wzdużnego; a) zasada generacji ładunków elektrycznych $\pm Q$ na powierzchniach zgodnych z kierunkiem działania siły F ; b) zasada budowy przetwornika [41]

Wartość ładunku elektrycznego w kulombach, powstająca na elektrodach pojedynczej płytki piezoelektrycznej w przypadku korzystania z efektu wzdużnego:

$$Q = d_{11} \cdot F \quad (3.49)$$

gdzie:

F – siła,

d_{11} – współczynnik piezoelektryczny ($2,3 \cdot 10^{-12}$ C/N – dla kwarcu).

Wartość Q nie zależy od rozmiarów, w celu zwiększenia czułości przetworników stosuje się łączenie płyt w zestawie, co powoduje wzrost błędu liniowości.

Ladunek indukowany na elektrodach przy wykorzystaniu efektu poprzecznego:

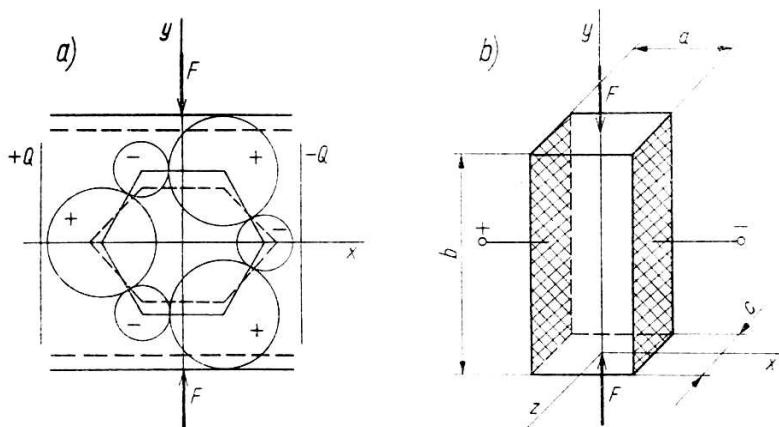
$$Q = -\frac{b}{a} \cdot d_{11} \cdot F \quad (3.50)$$

gdzie:

F – siła,

d_{11} – współczynnik piezoelektryczny,

a, b – wymiary kwarca wykonanego w postaci prostopadłościanu (rys. 3.55).



Rys. 3.55. Zasada działania i budowy kwarcowych przetworników piezoelektrycznych z wykorzystaniem efektu poprzecznego: a) zasada generacji ładunków elektrycznych $\pm Q$ na powierzchniach prostopadłych do kierunku działania siły F ; b) zasada geometrycznego kształtowania kryształu przy wykorzystaniu piezoelektrycznego efektu poprzecznego [41]

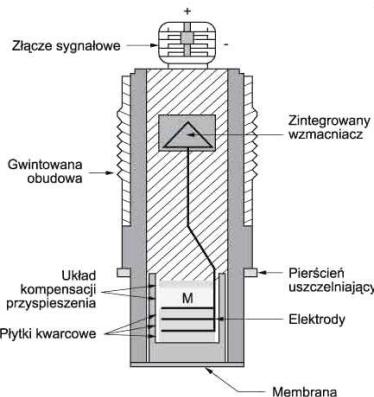
Czułość tego przetwornika zwiększa się poprzez zmianę stosunku b/a – ograniczeniem jest wyboczenie dopuszczalne i wytrzymałość mechaniczna.

Przy budowie czujników przyśpieszeń korzysta się z efektu wzdużnego, z efektu poprzecznego natomiast przy pomiarach sił i ciśnień.

O właściwościach dynamicznych decydują parametry układu mechanicznego czujnika oraz współpracującego z nim układu elektronicznego.

Zaletą piezoelektrycznych czujników do pomiaru siły jest duża czułość przy zachowaniu dużej sztywności elementu w który jest wbudowany. Budowane są przetworniki siły o zakresie pomiarowym równym pojedynczym niutonom aż do setek kiloniutonów.

Przetworniki piezoelektryczne umożliwiają, dzięki połączeniu z tzw. masą sejsmiczną, pomiary przyśpieszeń (rys. 3.56).



Rys. 3.56. Piezoelektryczny czujnik ciśnienia z kompensacją przyśpieszenia [15]

3.9. Elementy magnetosprężyste

Magnetosprężystością nazywa się zjawisko zależności przenikalności magnetycznej materiału od naprężenia spowodowanego działaniem siły, wywołującej rozciąganie, ściskanie, skręcanie lub zginanie materiału w granicach sprężystości.

Magnetostrykcją nazywa się zjawisko zmiany wymiarów materiału ferromagnetycznego umieszczonego w polu magnetycznym.

Względna zmiana przenikalności magnetycznej:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{2\lambda_\infty}{B_\infty^2} \mu\sigma \quad (3.51)$$

gdzie:

μ – przenikalność magnetyczna materiału,

σ – naprężenie w materiale,

$\Delta\mu$ – zmiana przenikalności magnetycznej,

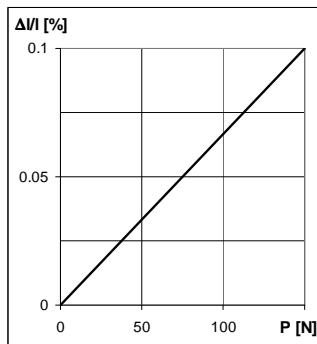
$\lambda_\infty = \Delta l_\infty / l$ – magnetostrykcia materiału przy nasyceniu magnetycznym,

Δl_∞ – zmiana długości materiału przy nasyceniu magnetycznym,

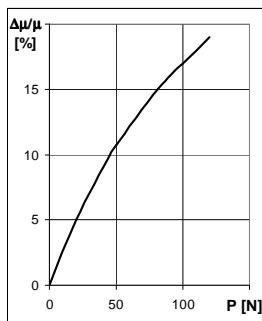
l – początkowa długość materiału,

B_∞ – indukcja odpowiadająca nasyceniu magnetycznemu.

Elementy magnetosprężyste wykonywane są z materiałów o dużej przenikalności magnetycznej, dużej magnetostrykci i małej indukcji przy nasyceniu (np. permalloy 78,5% lub 65% Ni) [45]. Na rysunkach 3.57 i 3.58 przedstawiono charakterystyki elementów magnetosprężystych.

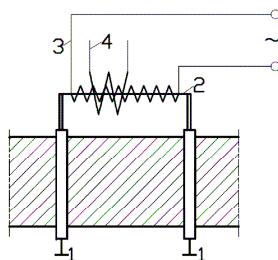


Rys. 3.57. Charakterystyka wydłużenia wzglednego elementu magnetosprzzystego [30]



Rys. 3.58. Charakterystyka wzglednej zmiany przenikalnosci magnetycznej elementu magnetosprzzystego [30]

W miejscu, gdzie ma nastapić pomiar naprężenia lub odkształcenia (np. badanego wału-rys. 3.59), umocowuje się dwa zaciski 1. Między nimi rozpięta jest ferromagnetyczna taśma 2 wykonana z materiału magnetosprzzystego.



Rys. 3.59. Zasada działania elementu magnetosprzzystego, 1 – zaciski, 2 – ferromagnetyczna taśma z materiału magnetosprzzystego, 3, 4 – cewki [30]

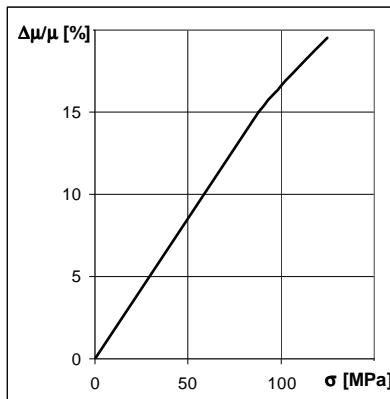
Na taśmie tej umieszczone są cewki 3 i 4; cewka 3 jest zasilana prądem zmiennym o częstotliwości akustycznej, cewka 4 połączona jest z miernikiem służącym do pomiaru małych SEM. Odkształcenia wału wywołują naprężenia w taśmie 2,

powoduje to zmianę jej przenikalności magnetycznej, co powoduje zmianę indukowanej SEM.

Jeżeli znana jest zależność:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = f(\sigma) \quad (3.52)$$

to pomiar naprężenia (rys. 3.60) może być wykonany poprzez pomiar SEM.



Rys. 3.60. Charakterystyka względnego przyrostu przenikalności magnetycznej w funkcji naprężenia [30]

3.10. Przetworniki hallotronowe

W przetwornikach tych wykorzystuje się zjawisko Halla, polegające na powstawaniu w płytce wykonanej z półprzewodnika lub metalu – włączonej w obwód prądu elektrycznego i umieszczonej w polu magnetycznym o kierunku prostopadłym do powierzchni płytki i kierunku prądu – tak zwanego napięcia Halla, o kierunku prostopadłym do kierunku prądu i kierunku pola magnetycznego (rys. 3.61).

Napięcie Halla określa wzór:

$$U_H = \frac{R_H}{d} \cdot I_H \cdot B = S \cdot I_H \cdot B \quad (3.53)$$

gdzie:

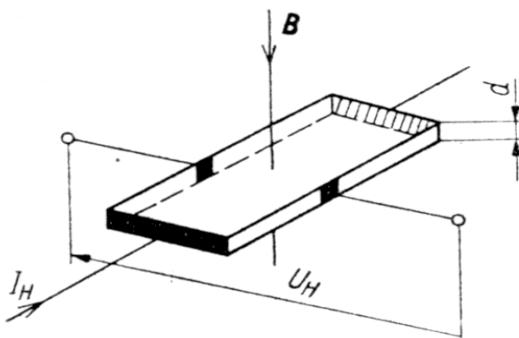
R_H – współczynnik Halla (zależny od materiału płytki, jego czystości i temperatury),

d – grubość płytki hallotronu,

I_H – natężenie prądu zasilającego,

B – indukcja magnetyczna,

$S=R_H/d$ – czułość hallotronu.



Rys. 3.61. Zasada działania hallotronu, B – wektor indukcji magnetycznej, d – grubość płytki przetwornika, I_H – prąd zasilający hallotron, U_H – napięcie Halla [30]

Materiałami o silnych własnościach hallotronowych są antymonek indu i arsenek indu.

Dla danej płytki hallotronu i określonej wartości natężenia prądu I_H napięcie Halla jest wprost proporcjonalne do indukcji B .

Przetworniki Halla wykorzystywane są do pomiarów siły, momentu obrotowego i nacisków, pola magnetycznego (rys. 3.62), niewielkich przemieszczeń liniowych (rys. 3.63), małych i dużych przemieszczeń kątowych, prędkości obrotowej (rys. 3.64), przyspieszeń, a także natężenia prądu (tzw. cegi prądowe).

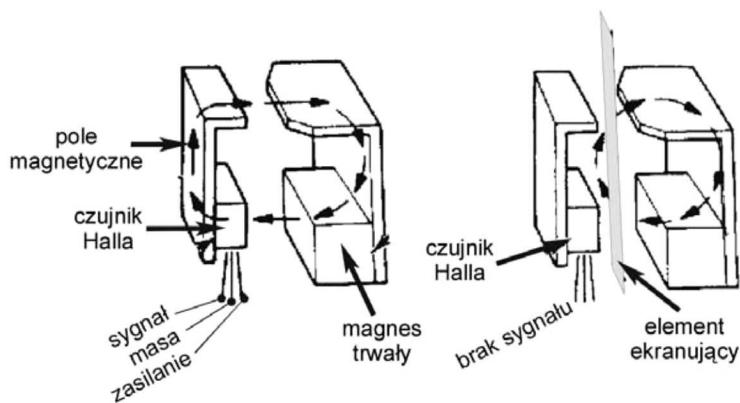
Przetworniki wykorzystujące zjawisko Halla wykonywane są (np.: metodą naparowywania) jako mikrostruktury (tzw. mikrosensory) o wymiarach rzędu mikrometrów pozwalające uzyskać napięcia na poziomie kilku do kilkuset mV.



Rys. 3.62. Hallotronowe czujniki pola magnetycznego [15]



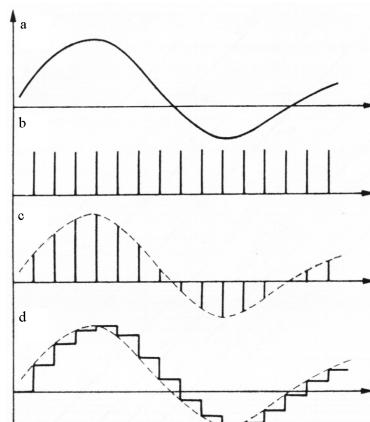
Rys. 3.63. Hallotronowy czujnik zbliżeniowy [15]



Rys. 3.64. Możliwa realizacja czujnika prędkości obrotowej lub położenia kątowego

4. Przetwarzanie analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe

We współczesnych systemach pomiarowych niemal zawsze w torze pomiarowym występują urządzenia cyfrowe (np. mikrokontroler, sterownik PLC, komputer PC), które wymagają dostosowania postaci sygnałów wejściowych do wymagań tych urządzeń. W sytuacji gdy w układzie pomiarowym występują sygnały analogowe (opisane funkcją ciągłą, które rejestruje się jako zmienność zależna od czasu., np.: jako sygnały wyjściowe z czujników, to niezbędne jest przetworzenie sygnału analogowego do postaci cyfrowej jako ciąg bitów. Przetwarzanie realizują przetworniki analogowo-cyfrowe. Sam proces przetwarzania sygnału składa się z trzech operacji: próbkowania, kwantowania i kodowania. Sygnał analogowy po procesie próbkowania staje się sygnałem dyskretnym, a po procesie kwantowania sygnałem cyfrowym o skończonej liczbie poziomów (rys. 4.1), natomiast w procesie kodowania każdemu z tych poziomów jest przypisane słowo binarne.

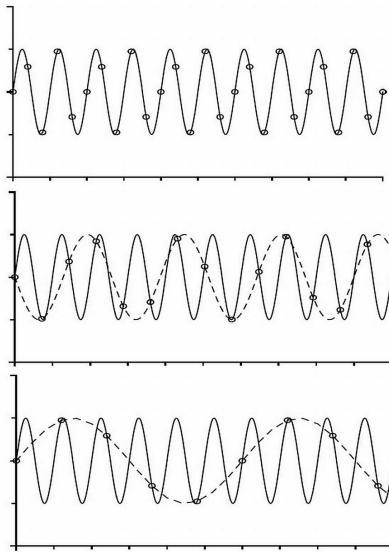


Rys. 4.1. Próbkowanie sygnału: a) sygnał analogowy, b) impulsy próbkujace, c) sygnał spróbkowany, d) sygnał po wyjściu z układu próbkującaco-pamiętającego [40]

4.1. Próbkowanie

Próbkowanie sygnału realizuje układ próbujący. Okres próbkowania, rozumiany jako czas pomiędzy pobieraniem poszczególnych próbek jest zwykle stały z uwagi na prostszą budowę układu próbującego i prostsze algorytmy przetwarzania sygnału.

Nie bez znaczenia jest też krótszy czas przesyłu sygnału. Zmienne okresy próbkowania stosuje się w układach pomiarowych bardziej złożonych, które dostosowują okres próbkowania w zależności od dynamiki wielkości mierzonej. W praktyce pomiarowej równie często używa się, jako parametru opisującego, odwrotności okresu próbkowania czyli częstotliwości próbkowania.



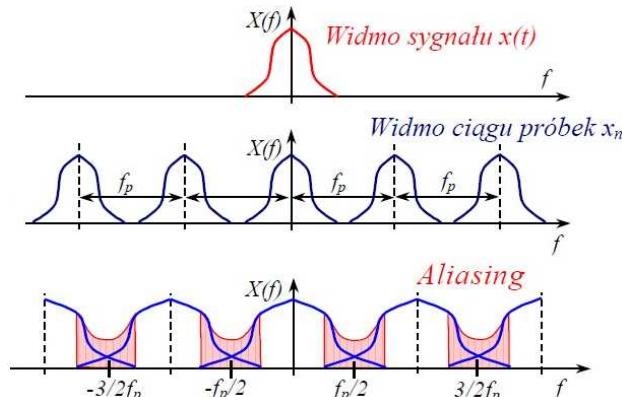
Rys. 4.2. Zmiany sygnału w zależności od częstotliwości próbkowania

Próbkowanie jest zastąpieniem ciągłej funkcji przez zbiór wartości pobranych w odstępach czasu równych okresowi. Z punktu widzenia użytkownika istotnym parametrem jest właściwy dobór częstotliwości próbkowania tak aby, z jednej strony, możliwe było niezakłócone odtworzenie sygnału mierzonego a z drugiej strony ograniczenie ilości pobieranych danych i nie zwiększanie wymagań (odnośnie szybkości działania) w stosunku do układu przetwarzającego. Sygnał pomiarowy powinien być tym szybciej próbkowany, im szybciej ulega zmianom, tzn. im wyższe składowe częstotliwościowe zawiera (rys. 4.2). Twierdzenie o próbkowaniu, zwane również twierdzeniem Shannona-Kotielnikowa, określa częstotliwość próbkowania sygnału ściśle dolnopasmowego, którego widmo jest ograniczone do częstotliwości ω_g . W myśl tego twierdzenia, częstotliwość próbkowania ω_s musi być co najmniej dwa razy większa od maksymalnej pulsacji ω_g zawartej w widmie sygnału ciągłego, aby sygnał można było odtworzyć z sygnału próbkowanego. Maksymalna dopuszczalna w widmie sygnału ciągłego pulsacja $\omega_g/2$ nosi nazwę pulsacji Nyquista.

$$\omega_s \geq 2\omega_g \quad (4.1)$$

W przypadku zastosowania częstotliwości próbkowania ω_s nie spełniającej powyższego warunku, odtworzenie tak spróbkowanego sygnału analogowego daje zniekształcony obraz. Pojawianie się zakłóceń spowodowanych zbyt małą częstotliwością próbkowania nazywa się aliasingiem lub nakładaniem widm, co obrazuje istotę problemu: proces modulacji sygnału próbkowanego z częstotliwością ω_s (w ujęciu teorii sygnałów operacja próbkowania jest równoważna modulacji amplitudy) powoduje przesuwanie oryginalnego widma o ω_s , $2\omega_s$, $3\omega_s$ (oprócz widma w oryginalnym położeniu). Gdy częstotliwość próbkowania ω_s jest zbyt mała (nie spełnia warunku (4.1)), część widma, która zawiera się wokół częstotliwości próbkowania ω_s nałoży się na widmo oryginalne dając wspomniane wcześniej zakłócenia (rys. 4.3). Nakładanie się widm (zjawisko aliasingu) wyeliminować można poprzez przyjęcie odpowiednio dużej częstotliwości próbkowania oraz filtrację sygnału analogowego przed próbkowaniem, aby ograniczyć jego widmo do częstotliwości $\omega_s/2$. Filtracja sygnału przed próbkowaniem pozwala na eliminację zakłóceń o częstotliwości wyższej niż częstotliwość Nyquista. Należy dodać, że sama filtracja cyfrowa nie zapobiega zjawisku aliasingu gdyż zjawisko to pojawi się na etapie wcześniejszym, tj. próbkowaniu. W praktyce zawsze występują resztowe nakładania się widm, które spowodowane są przez szum, nieidealną wstępnią filtrację oraz składowe sygnału o wyższej częstotliwości. Efekt ten można zredukować zwiększając częstotliwość próbkowania, np.: do wartości nieco większej niż (4.1):

$$\omega_s \geq 2,5\omega_g \quad (4.2)$$

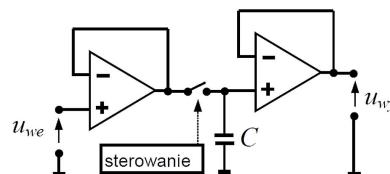


Rys. 4.3. Widmo sygnału, jego powielenie oraz nakładanie się widm (aliasing) przy zbyt małej częstotliwości próbkowania

Przetwarzanie sygnałów szybkozmiennych wymaga stosowania wyższych częstotliwości próbkowania, co przy uwzględnieniu czasu apertury (okno czasowe w czasie wykonywania pomiaru) powodujące niepewność amplitudy w przypadku

zmiany sygnału w trakcie pomiaru) powoduje, że korzystne jest zastosowanie układu próbkujaco-pamiętajacego S/H (ang. Sample and Hold), który realizowany jest w postaci klucza (przełącznika) i kondensatora o małej upływności (rys. 4.4). Klucz doprowadza po przełączeniu próbkowane napięcie do kondensatora, który ma za zadanie utrzymać poziom sygnału do końca procesu kwantyzacji, który jest zwykle dłuższy.

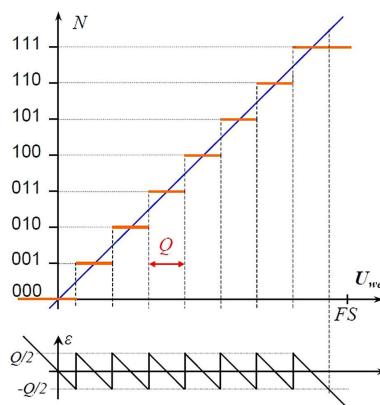
Ważnymi parametrami układu próbkujaco-pamiętajacego są: czas przyjęcia próbki (czas od początku impulsu próbkującego do ustalenia się wartości napięcia wyjściowego równej wartości napięcia wejściowego) oraz szybkość spadku napięcia pamiętanego (wynika z rozładowania kondensatora).



Rys. 4.4. Schemat ideowy układu próbkujaco-pamiętajacego [41]

4.2. Kwantowanie

Kwantowanie polega na przypisaniu każdej pobranej próbce wartości ze skończonego zbioru o liczności N , gdzie N jest liczbą poziomów (wartości) na jakie podzielono zakres przetwarzania przetwornika. Zakres przetwarzania dzieli się na N przedziałów o szerokości zwanej kwantem Q , który jest najmniejszą różnicą sygnału analogowego rozróżnialną przez układ kwantowania (rys. 4.5).



Rys. 4.5. Charakterystyka układu kwantującego [40]

Nieuniknionym skutkiem takiego podziału jest błąd kwantowania (nazywany również błędem dyskretyzacji). Określa on różnicę pomiędzy wynikiem kwantowania (wartość cyfrową) a wartością analogową wielkości mierzonej. Przy jednakowej szerokości przedziałów kwantowania równej kwantowi błąd kwantowania zmienia się okresowo od 0 do $-Q$ z okresem Q . Przyjęcie nierównomiernego podziału zakresu przetwarzania, gdzie pierwszy i ostatni przedział mają szerokość równą $Q/2$ a pozostałe szerokość q , powoduje, że błąd kwantowania zmienia się okresowo od $-Q/2$ do $Q/2$ z okresem Q . Przetworniki A/C mają najczęściej właśnie taki nierównomierny podział zakresu przetwarzania z mniejszym błędem kwantowania. Błąd kwantowania traktowany jako zakłócenie bywa nazywany szumem kwantowania.

4.3. Kodowanie sygnałów

Komunikacja przetworników A/C i C/A z elementami systemu cyfrowego wymaga użycia odpowiedniego kodu. Z szerokiej gamy kodów w praktyce stosowane są tylko niektóre z nich: zwykły binarny, kod dwójkowy przesunięty, kod uzupełnień do dwóch, kod dziesiętny z zapisem dwójkowym (BCD).

Kodowanie jest przyporządkowaniem cyfrowych stów poszczególnym poziomom kwantowania. Naturalny kod dwójkowy (binarny) przedstawia liczby z przedziału (0-FS) w postaci:

$$N = FS \cdot (a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_{n-1} 2^{-(n-1)} + a_n 2^{-n}) \quad (4.3)$$

Bit pierwszy z lewej a_1 jest bitem najbardziej znaczącym (MSB – ang. Most Significant Bit) o wagie równej $\frac{1}{2}FS$. Bit pierwszy z prawej a_n jest bitem najmniej znaczącym (LSB – ang. Least Significant Bit) o wagie równej $2^{-n}FS$.

$$1 \text{ LSB} = \frac{FS}{2^n} \quad (4.4)$$

Słowo kodowe złożone z samych jedynek nie odpowiada wartości pełnego zakresu przetwarzania FS , lecz wartości mniejszej o wagę LSB tzn. $(1-2^{-n})FS$, np.: dla: $n=12$, i zakresu $FS=0-10$ V, zapis: $N=111111111111$, odpowiada wartości napięcia $U=(1-2^{-12})10$ V = 9,99756 V.

W przetwornikach bipolarnych występuje konieczność zapisu znaku i kodowania liczb ujemnych. W tym celu stosuje się najczęściej jeden z trzech następujących sposobów:

- przesunięty kod dwójkowy,
- zapis uzupełnieniowy do dwóch,

- zapis znak - moduł.

W kodzie dwójkowym z przesunięciem kodowanie jest realizowane jak w kodzie naturalnym przy przesuniętym o połowę zakresie przetwarzania, czyli o wartość MSB. Kod uzupełnieniowy do dwóch charakteryzuje następującą właściwość: suma dwóch słów kodowych, odpowiadających identycznym co do modułu wartościom analogowym ale o różnych znakach, wynosi zero (plus przeniesienie), np.:

$$\begin{array}{r}
 0,5FS = 0010 \\
 - 0,5FS = 1110 \\
 \hline
 \text{suma} = 1000\bar{0}
 \end{array} \tag{4.5}$$

Różnica pomiędzy kodem uzupełnieniowym a kodem dwójkowym przesuniętym ogranicza się do zanegowania najbardziej znaczącego bitu (MSB), gdzie bit ten jest bitem znaku.

Kody BCD są najczęściej stosowane w przetwornikach współpracujących z miernikami cyfrowymi. Liczba dziesiętna przedstawiana jest przy pomocy 4 bitów i dla najmniej znaczącego bitu LSB wynosi:

$$LSB = q = \frac{FS}{10^d} \tag{4.6}$$

i dla zakresu pomiarowego $FS=5 V$ i liczbie cyfr dziesiętnych $d=3$ wartość $LSB=0,01 V$, a w zapis w kodzie BCD: 0000 0000 0001.

4.4. Parametry przetworników A/C i C/A

Podstawowymi parametrami przetworników A/C i C/A są:

1. Zakres przetwarzania FS .
2. Rozdzielcość - liczba stanów cyfrowych: określana liczbą bitów n cyfrowego słowa WY/WE:

$$\Delta U_r = \frac{FS}{N} = \frac{FS}{2^n} = Q \tag{4.7}$$

3. Dokładność przetwornika - błąd bezwzględny:

$$\Delta U_b = U_{rz} - U_{ideal} \tag{4.8}$$

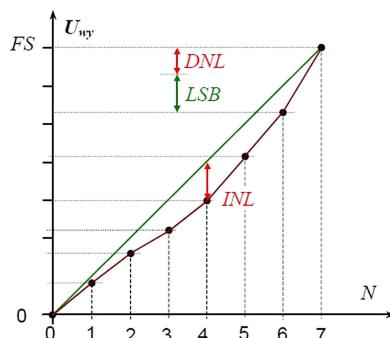
lub względny:

$$\delta = \frac{\Delta U_b}{FS} \quad (4.9)$$

Dokładność będąca maksymalną sumą wszystkich błędów przetwornika – jest zawsze gorsza od jego rozdzielczości:

$$\Delta U_b > \Delta U_r \quad (4.10)$$

4. Częstotliwość przetwarzania - liczba okresów przetwarzania na sekundę podawana w próbkach na sekundę (SPS – ang. samples per second).
 5. Stosunek sygnału do szumu SNR.
 6. Czas ustalania (dla przetworników C/A) - czas od chwili zmiany sygnału na wejściu do ustalenia się sygnału na wyjściu z dokładnością równą $0,5Q$.
- Błędy przetworników to przede wszystkim:
- 1) błąd nieliniowości całkowej INL (ang. Integral Non Linearity, rys. 4.6),
 - 2) błąd nieliniowości różniczkowej DNL (ang. Differential Non-Linearity, rys. 4.6),
 - 3) błąd przesunięcia ΔU_0 ,
 - 4) błąd wzmacnienia k .



Rys. 4.6. Błędy nieliniowości całkowej (INL) i różniczkowej (DNL) przetwornika C/A [35]

4.5. Przetworniki analogowo-cyfrowe (A/C)

Przetworniki analogowo-cyfrowe (ang. Analog to Digital Converter - ADC) służą do zamiany wielkości mierzonej o charakterze ciągłym na wielkość dyskretną. Stosowane są różne metody przetwarzania A/C wartości napięcia: bezpośrednie (porównawcze), które formują sygnał cyfrowy na podstawie wyniku porównania napięcia przetwarzanego z wzorcowym oraz pośrednie (przetworzeniowo-porównawcze), które formują wynik cyfrowy dwustopniowo, przekształcając najpierw

napięcie na wielkość pomocniczą (np.: czas, częstotliwość), a potem wielkość tą przetwarzają na sygnał cyfrowy.

Do bezpośrednich metod całkowania należą metody różnicowe (bezpośredniego porównania):

- przetwarzania równoległego,
- przetwarzania szeregowo – równoległego

oraz metody kompensacyjne:

- kompensacji równomiernej,
- kompensacji wagowej,
- kompensacji wieloprzebiegowej.

Wśród metod pośrednich można wyróżnić metody czasowe:

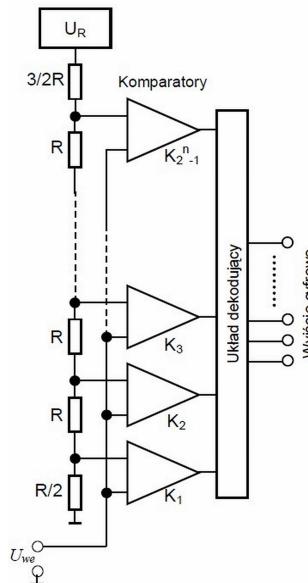
- pojedynczego całkowania,
- podwójnego całkowania,
- poczwórnego całkowania

oraz częstotliwościowe:

- równoważenia ładunków,
- delta – sigma.

a) Przetwornik A/C równoległy (Flash Type)

Schemat przetwornika A/C równoleglego przedstawia rys. 4.7. Napięcie wejściowe U_{we} jest jednocześnie porównywane z $2^n - 1$ poziomami odniesienia przy użyciu komparatorów napięcia. Cyfrowe stany wyjściowe komparatorów, po odpowiednim zakodowaniu, dają cyfrową informację wyjściową w kodzie dwójkowym.

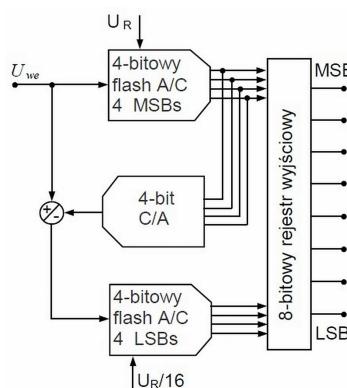


Rys. 4.7. Przetwornik analogowo-cyfrowy równoległy (Flash Type) [31]

Zaletą tego typu przetwornika jest duża szybkość przetwarzania, wadą - duża liczba komparatorów w przetwornikach wielobitowych. Przetworniki równolegle mają rozdzielczość od 4 do 12 bitów i częstotliwość przetwarzania do 300 MHz.

b) Szeregowo - równoległy przetwornik A/C (Half Flash Type)

Schemat przetwornika A/C szeregowo-równoległego przedstawia rys. 4.8. Przetwarzanie odbywa się dwuetapowo: najpierw konwersja zgrubna, potem konwersja dokładna różnicy miedzy sygnałem wejściowym a wytworzonym w ultraszybkim przetworniku C/A napięciem odpowiadającym wynikowi pierwszego etapu. Zaletą tego przetwornika jest dużo mniejsza złożoność układu niż w przypadku przetwornika typu flash o tej samej rozdzielczości, przy zachowaniu bardzo dużej częstotliwości przetwarzania dochodzącej do 100 MHz.

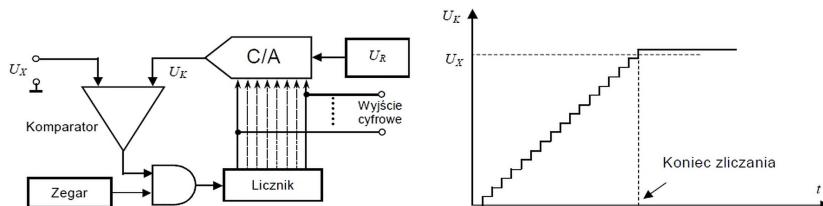


Rys. 4.8. Przetwornik analogowo-cyfrowy szeregowo - równoległy (Half Flash Type) [35]

c) Przetwornik A/C z kompensacją równomierną (zliczający - Counter Type)

Schemat przetwornika A/C z kompensacją równomierną przedstawia rys. 4.9. Po wyzerowaniu licznika rozpoczyna się zliczanie impulsów zegarowych i trwa do chwili, gdy napięcie kompensujące U_K przekroczy wartość napięcia przetwarzanego U_X . Czas trwania zliczania jest proporcjonalny do wartości napięcia U_X .

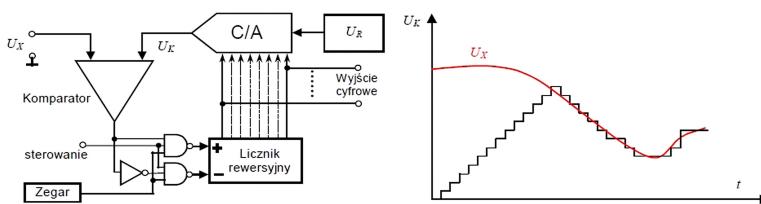
Wadą tej metody przetwarzania jest stosunkowo długi czas przetwarzania – maksymalnie aż do: $2^n T_w$ gdy $U_X = U_R$. Przykładowo dla rozdzielczości $n=10$, i częstotliwości $f_w=50$ MHz, maksymalny czas przetwarzania wynosi 20 ms.



Rys. 4.9. Przetwornik analogowo cyfrowy z kompensacją równomierną (zliczający - Counter Type) [35]

d) Kompensacyjny przetwornik A/C śledzący (tracking type)

Schemat śledzącego przetwornika A/C przedstawia rys. 4.10. Przetwornik śledzący różni się od zliczającego zastosowaniem licznika rewersyjnego wraz z układem sterującym. Sygnały zegarowe kierowane są na wejście zwiększające lub zmniejszające stan licznika w zależności od tego, jaki znak ma różnica napięć kompensującego U_K i wejściowego U_x . Zaletą tego rozwiązania jest możliwość znacznego zwiększenia szybkości przetwarzania, ale pod warunkiem, że sygnał wejściowy nie jest zbyt szybko zmienny.

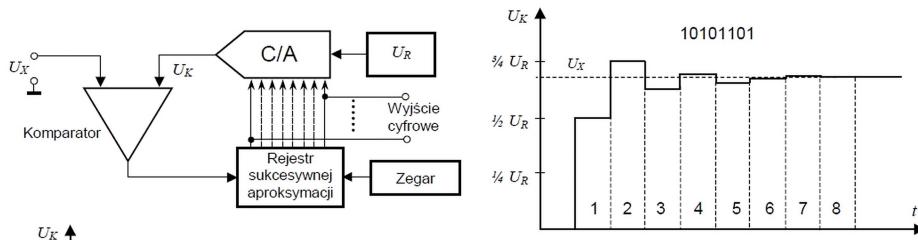


Rys. 4.10. Przetwornik analogowo cyfrowy śledzący (tracking type) [31]

e) Przetwornik A/C z kompensacją wagową (Successive Approximation)

Schemat przetwornika A/C z kompensacją wagową przedstawia rys. 4.11. Metoda kompensacji wagowej polega na kolejnym „ważeniu” napięcia wejściowego U_x przy pomocy malejących kwantów ($0,5U_R$; $0,25U_R$,...) napięcia kompensującego U_K , których wagi odpowiadają pozycjom kolejnych bitów. Dzięki temu równoważenie napięcia wejściowego wymaga tylko n (liczba bitów) porównań.

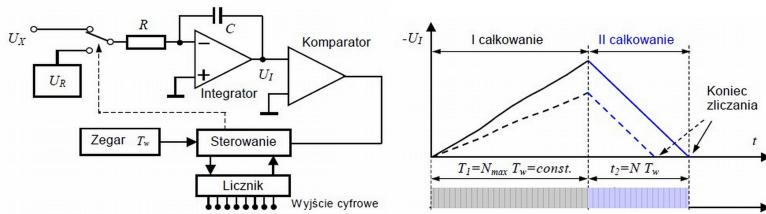
Przetworniki z kompensacją wagową mają rozdzielcość od 8 do 16 bitów i częstotliwość przetwarzania do 5 MHz.



Rys. 4.11. Przetwornik analogowo cyfrowy z kompensacją wagową (Successive Approximation) [35]

f) Przetwornik A/C z podwójnym całkowaniem (Dual Slope Integrating)

Schemat przetwornika A/C z podwójnym całkowaniem przedstawia rys. 4.12. Podczas I etapu całkowane jest napięcie U_x . Czas T_1 wyznaczany przez licznik jest stały. Podczas II etapu całkowane jest napięcie stałe U_R o przeciwniej polaryzacji do U_x a licznik mierzy odcinek czasu, jaki jest potrzebny do rozładowania kondensatora.



Rys. 4.12. Przetwornik analogowo cyfrowy z podwójnym całkowaniem (Dual Slope Integrating) [33]

Bezwzględne wartości rezystancji R , pojemności C oraz częstotliwości zegara $f_w = 1/T_w$, nie mają wpływu na dokładność przetwarzania. Uśrednianie wykonywane w czasie pierwszego całkowania umożliwia tłumienie zakłóceń okresowych nałożonych na mierzone napięcie. W tym celu konieczne jest dopasowanie czasu pierwszego całkowania T_I do okresu zakłóceń T_z lub jego wielokrotności.

g) Metoda częstotliwościowa przetwarzania A/C

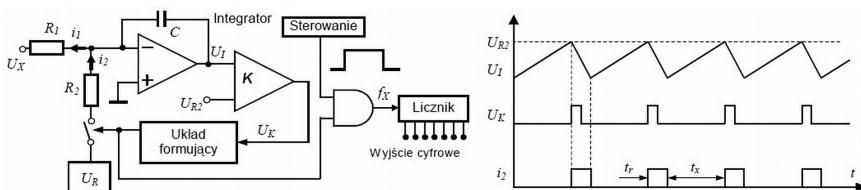
W tej metodzie stosuje się równoważenie ładunków pochodzący ze źródła przetwarzanego napięcia U_x przez impulsy ładunkowe o stałej wartości dostarczane do integratora. Sposób przetwarzania ilustruje rysunek 4.13.

$$\begin{aligned} i_1 \cdot (t_x + t_r) &= i_2 \cdot t_r \\ \frac{U_x}{R_1} \cdot (t_x + t_r) &= \frac{U_R}{R_2} \cdot t_r \end{aligned} \quad (4.11)$$

Częstotliwość impulsów:

$$f_x = \frac{1}{t_x + t_r} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{t_r} \cdot \frac{U_x}{U_R} \quad (4.12)$$

jest proporcjonalna do napięcia przetwarzanego U_x .

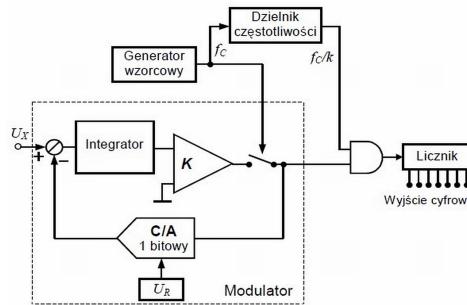


Rys. 4.13. Metoda częstotliwościowa przetwarzania A/C [35]

h) Przetwornik A/C typu delta-sigma ($\Delta-\Sigma$)

Schemat przetwornika A/C delta-sigma przedstawia rys. 4.14. Przetwornik $\Delta-\Sigma$ składa się z modulatora $\Delta-\Sigma$ i cyfrowego filtra dolnoprzepustowego. Modulator $\Delta-\Sigma$

wytwarza strumień bitów, którego średnia wartość reprezentuje poziom sygnału wejściowego. Dokładność odwzorowania sygnału wejściowego zależy od ilości impulsów wytworzonych strumienia bitów, a ta zależy od częstotliwości próbkowania. W przetwornikach Δ - Σ stosuje się tzw. nadpróbkowanie, tzn. zwiększenie częstotliwości próbkowania powyżej częstotliwości Nyquista.



Rys. 4.14. Schemat przetwornika Δ - Σ z modulacją 1-go rzędu [31]

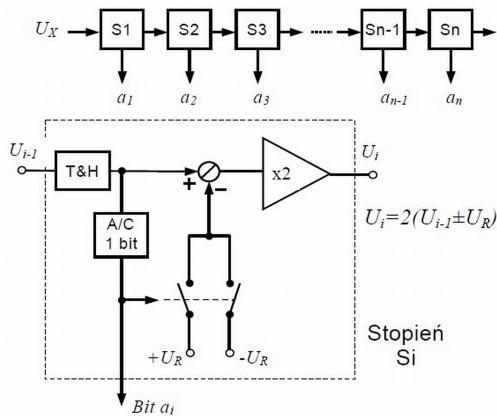
Zwiększenie częstotliwości próbkowania zmniejsza również wartość szumów przetwarzania, tzn. podnosi stosunek sygnału do szumu SNR . Efektywniejsze zmniejszenie szumów można uzyskać stosując modulator wyższego rzędu (rys. 4.15).



Rys. 4.15. Wpływ rzędu modulatora Δ - Σ i nadpróbkowania na współczynnik SNR

i) Przetwornik A/C potokowy (pipeline ADC lub subranging ADC)

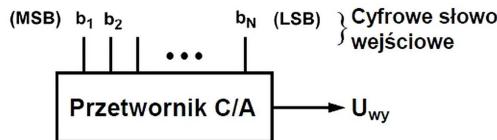
Schemat przetwornika A/C potokowego przedstawia rys. 4.16. Przetwornik ten składa się z szeregu kolejnych stopni przetwarzania, z których każdy zawiera układ siedząco - pamiętający (Track and Hold), oraz przetworniki A/C i C/A o niskiej rozdzielczości. Przetwornik jednocześnie przetwarza wiele kolejnych próbek sygnału wejściowego - w każdym stopniu potoku inną. Charakteryzuje go opóźnienie przetwarzania wynikające z pracy potokowej. Jego zalety to małe zużycie energii i częstotliwość przetwarzania rzędu 100-200 MHz przy rozdzielczości 10-14 bitów.



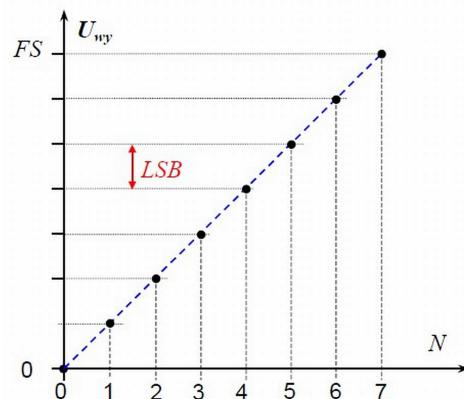
Rys. 4.16. Przetwornik A/C potokowy (pipeline ADC lub subranging ADC) [35]

4.6. Przetworniki cyfrowo-analogowe (C/A)

Przetworniki cyfrowo-analogowe (ang. Digital to Analog Converter) służą do zamiany sygnału dyskretnego na sygnał ciągły w czasie (rys. 4.17). Charakterystykę statyczną przetwornika C/A przedstawiono na rysunku 4.18.



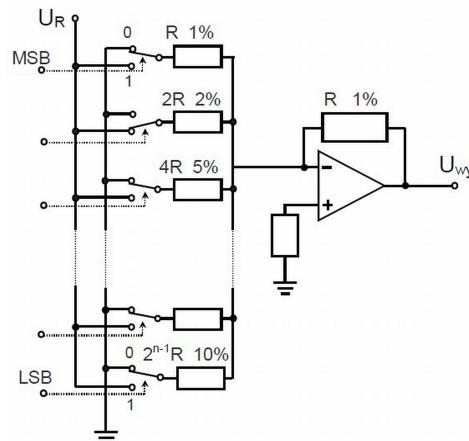
Rys. 4.17. Schemat ideowy przetwornika C/A



Rys. 4.18. Charakterystyka statyczna przetwornika C/A [35]

a) Przetwornik C/A z rezystorami wagowymi

Schemat przetwornika C/A z rezystorami wagowymi przedstawia rysunek 4.19. Zmiana rezystancji wejściowych R pozwala zastosować inny kod wejściowy (BCD lub Hex.), wymaga dokładnego źródła napięciowego U_R , najmniejsze rezystancje muszą być najdokładniejsze, wymaga małej rezystancji kluczy. Przetwornik tego typu jest względnie szybki, ale cechuje go niska rozdzielcość.



Rys. 4.19. Przetwornik C/A z rezystorami wagowymi [33]

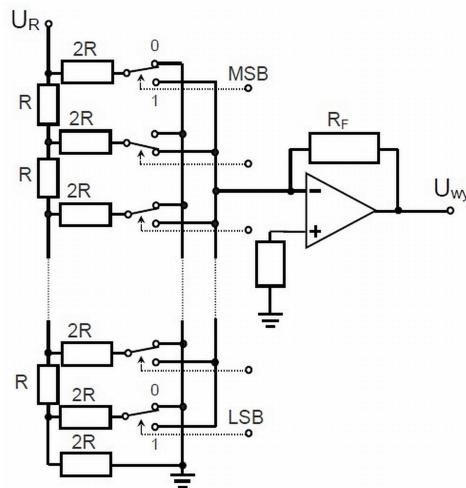
b) Przetwornik C/A z drabinką rezystorów R-2R

Schemat przetwornika C/A z drabinką rezystorów R-2R przedstawia rysunek 4.20. Zmiana rezystancji wejściowych R pozwala zastosować inny kod wejściowy (BCD lub Hex.), wymaga tylko dwóch wartości oporników, rezystancje R muszą być precyzyjnie dobrane, nie wymaga ścisłej wartości rezystancji R , nie wymaga małej rezystancji kluczy. Przetwornik cechuje względna szybkość i wysoka rozdzielcość.

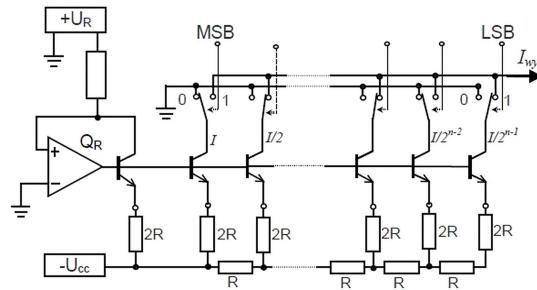
c) Przetwornik C/A z ważeniem prądów przy użyciu drabinki rezystorów R-2R

Schemat przetwornika C/A z ważeniem prądów przy użyciu drabinki rezystorów R-2R przedstawia rysunek 4.21. Przetwornik ten cechuje:

- krótki czas ustalania przetwornika dzięki zastosowaniu przełączania prądów,
- dobra liniowość,
- niska impedancja wyjściowa,
- występowanie zakłóceń impulsowych na wyjściu,
- konieczność zwielokrotnienia powierzchni emiterowych kolejnych tranzystorów,
- krótki czas ustalania przetwornika dzięki zastosowaniu przełączania prądów,
- jeśli sygnał wyjściowy ma być napięciowy wymaga konwersji prądu na napięcie.



Rys. 4.20. Przetwornik C/A z drabinką rezystorów R-2R [35]



Rys. 4.21. Przetwornik C/A z ważeniem prądów przy użyciu drabinki rezystorów R-2R [31]

4.7. Zasady doboru przetworników A/C i C/A

Wybór przetworników A/C i C/A należy uzależnić od następujących czynników:

- rozdzielczości,
- rodzaju przetwornika (sposobu działania),
- szybkości (częstotliwość),
- sposobu kodowania,
- zakresu przetwarzania,
- sposobu zasilania,
- możliwości konfiguracyjnych (programowe lub sprzętowe),
- wielkości błędów: przesunięcie zera, nieliniowości całkowej i różniczkowej.

5. Komputer w systemach pomiarowych

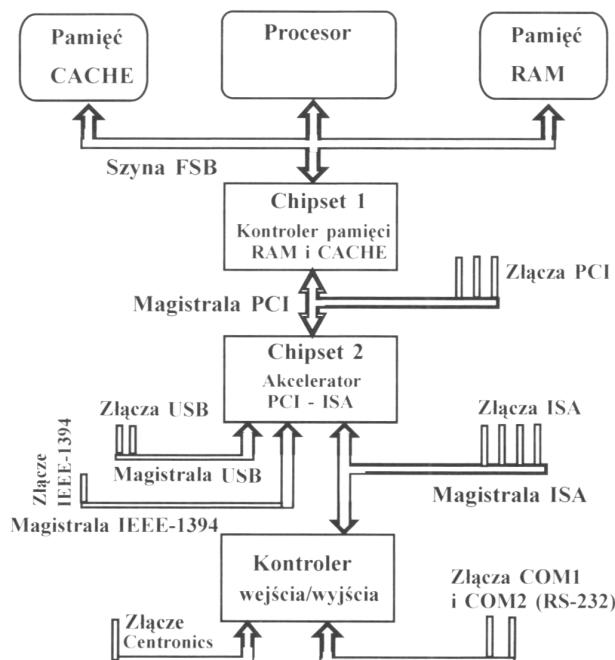
Jak opisano wcześniej, wiele systemów pomiarowych wykorzystuje jako kontroler komputer klasy PC. Obecnie coraz większą rolę zaczynają odgrywać wersje mobilne (notebooki, netbooki, a w prostszych zastosowaniach również palmtopy). Z uwagi na specyfikę konstrukcji (duża zwartość, utrudniona zmiana konfiguracji) w przypadku używania komputerów mobilnych jako kontrolerów systemu pomiarowego, większą rolę będą odgrywały urządzenia pomiarowe dołączane poprzez różnorodne interfejsy komunikacyjne. Zastosowanie popularnych komputerów osobistych jest prostym i tanim sposobem na zbudowanie niezbyt skomplikowanego systemu pomiarowego. Jeżeli wykorzystywane urządzenia pomiarowe można połączyć z komputerem wykorzystując standardowe interfejsy komunikacyjne (Centronics, RS232C), których obsługa jest standardowo implementowana w popularnych systemach operacyjnych, to trud i koszt budowy prostego systemu może ograniczać się do wykonania okablowania potrzebnego do połączenia elementów systemu. Budowa bardziej wydajnego lub bardziej złożonego systemu pomiarowego na bazie klasycznego komputera PC może wymagać zainstalowania dodatkowych podzespołów (np.: różnych kart: pomiarowych, sterujących, oscyloskopowych i in.) co i tak jest zwykle mnie kosztowne niż zakup nowego urządzenia (np.: oscyloskopu).

Typowy komputer PC zbudowany jest w sposób modułowy, co w pewnym zakresie, umożliwia rozbudowę lub zmianę konfiguracji sprzętowej. Podstawowym elementem jest płyta główna integrująca najważniejsze elementy i magistrale komunikacyjne (rys 5.1). Na płycie głównej umieszczone są: jednostka centralna (procesor), szyna FSB (ang. Front Side Bus) do połączenia procesora z pamięcią RAM (Random Access Memory) i pamięcią CACHE i kontrolerem obu tych pamięci. Kontroler ten pośredniczy również pomiędzy szyną FSB z magistralą PCI. Oprócz tego na płycie głównej znajduje się kontroler złączy standardowych (RS232C, Centronics, USB, Ethernet) i czasem dodatkowych (Fire Wire, Bluetooth, IrDA, WiFi). Typ procesora, wielkość zainstalowanej pamięci operacyjnej, wielkość dysku twardego będą wpływać na osiągi komputera, co jest istotne w przypadku bardziej wymagających aplikacji. Ze względu na możliwość budowy systemu pomiarowego na bazie komputera osobistego istotne będą następujące czynniki:

- a) zaimplementowane interfejsy komunikacyjne i magistrale (szyny) danych – od nich będzie zależała możliwość dołączania elementów systemu pomiarowego,
- b) moc obliczeniowa – uwarunkowana głównie procesorem (na szybkość pracy duży wpływ ma również wielkość pamięci RAM),

- c) system operacyjny – z uwagi na możliwość tworzenia lub uruchamiania oprogramowania umożliwiającego realizację założonych funkcji systemu.

Hierarchia ważności powyższych czynników jest obowiązująca dla większości aplikacji, w niektórych przypadkach może okazać się jednak, że najistotniejsza jest moc procesora (w przypadku wymagających algorytmów przetwarzania sygnałów będzie to parametr kluczowy) lub też system operacyjny (niektóre aplikacje mogą wymagać wykonywania operacji w czasie rzeczywistym, co jest nie do zrealizowania w najbardziej popularnych systemach operacyjnych, np.: MS Windows, Linux).



Rys. 5.1. Podstawowe komponenty płyty głównej, magistrale i ich złącza w komputerze klasy PC [31]

W systemie pomiarowym komputer osobisty spełnia następujące funkcje:

- sterowanie systemem pomiarowym,
- przetwarzanie danych, zarówno w trakcie pomiarów (on-line) jak i danych zarchiwizowanych – przetwarzanie on-line realizuje zwykle program sterujący pomiarami, zarchiwizowane dane opracowywane są często przy użyciu specjalizowanych programów (Matlab, Mathematica i in.),
- rejestracja danych pomiarowych,
- transmisja danych do użytkowników lub urządzeń nie będących elementami systemu pomiarowego,

e) obsługa myszy, klawiatury, ekranów dotykowych i urządzeń wskazujących (monitor) itp.

Powysze funkcje mogą realizować inne mikroprocesorowe kontrolery systemów pomiarowych: mikrokontrolery, sterowniki PLC itp. Z uwagi na zwykle mniejszą moc obliczeniową, nie realizują one skomplikowanych algorytmów przetwarzania danych, nie zawsze też umożliwiają dostęp bezpośredni do obsługi aplikacji realizującej pomiary – nie muszą być wyposażone w urządzenia peryferyjne.

Z uwagi na możliwość budowy systemu pomiarowego najistotniejsze są magistrale, które mogą być wykorzystane do podłączania elementów systemu pomiarowego do komputera. Ze względu na sposób podłączania urządzeń, magistrale można podzielić na dwie grupy:

- umożliwiające instalowanie urządzeń w obudowie komputera magistrale równoległe (PCI, PCI Express, ISA, PCMCIA, ExpressCard),
- wykorzystujące połączenia kablowe magistrale szeregowe (USB, Fire Wire).

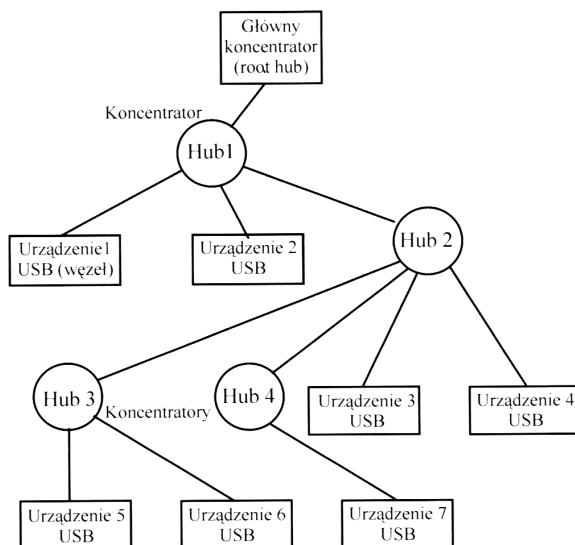
Z uwagi na dynamikę systemu pomiarowego najbardziej atrakcyjne są magistrale równoległe, umożliwiające z reguły najwyższe szybkości transmisji danych. Najczęściej wykorzystywana jest magistrala PCI (obecnie coraz częściej PCI Express), w zależności od wersji, oferująca różną szybkość transmisji danych. Magistrala ta wyposażona jest w 32- lub 64-bitową szynę danych, a szybkość transferu danych jest uzależniona od trybu transmisji (seryjny – po zaadresowaniu następuje transmisja dowolnie długiego bloku danych – transfer do 264 MB/s), zapis lub odczyt pojedynczego słowa – 44 lub 66 MB/s) oraz częstotliwości taktowania szyny danych (33 lub 66 MHz). Duże szybkości transmisji wynikają z lokalizacji magistrali PCI w architekturze komputera osobistego – jest ona najbliżej procesora, pomijając oczywiście szynę FSB. Producenci oferują płyty główne z różną liczbą (3-6) gniazd na urządzenia podłączane do magistrali PCI, co pozwala na realizację pożąданej konfiguracji. Magistrala PCI Express tym różni się od PCI, że każde z gniazd jest połączone z kontrolerem magistrali dwoma kanałami, co z jednej strony umożliwia jednoczesne przekazywanie danych w obu kierunkach i nie wymaga dzielenia szyny danych pomiędzy wszystkie urządzenia. W zależności od wersji występuje od 1 do 16 linii nadawczo-odbiorczych dla każdego z urządzeń, co skutkuje szybkościami transferów od 250 MB/s do 16 GB/s. Gama urządzeń, kart PCI i PCI Express, oferowanych przez producentów jest bardzo szeroka i obejmuje m. in.:

- wielofunkcyjne karty pomiarowe, (NI PCI-6259, NI PCIe-6321),
- karty oscyloskopowe, (NI PCI-5154),
- wielokanałowe karty wejść i wyjść cyfrowych oraz analogowych, (NI PCI-6503, NI PXI-6723),
- karty z kontrolerami interfejsów komunikacyjnych (GPIB, RS-232C->NI PCIe-8430/16 (RS232), CAN-> NI PCI-8513/2itd.),
- karty przetworników analogowo-cyfrowych i cyfrowo-analogowych (NI PCIe-4498).

Magistrala ISA, wyposażona w 8- lub 16-bitową szynę danych, nie jest już praktycznie instalowana na płytach głównych komputerów osobistych – można ją spotkać w starszych komputerach osobistych lub niektórych sterownikach PLC. Szybkość transmisji do 8 MB/s, a gama urządzeń jest równie szeroka, jak dla magistrali PCI.

Magistrale PCMCIA oraz Express Card są najczęściej wykorzystywane w komputerach przenośnych do instalowania dodatkowych urządzeń: karta sieciowa (dawniej), modem GSM, karta pamięci. Można je wykorzystać do zainstalowania kart pomiarowych (różnych typów), kart interfejsów komunikacyjnych (RS-232C, CAN, itd.). Magistrale mają 32- i 64-bitowe szyny danych, taktowane są częstotliwością 33 (i 66) MHz a szybkość transmisji wynosi 132 MB/s.

Magistrala szeregową USB jest standardowo instalowana we współczesnych komputerach osobistych i jest chętnie wykorzystywana do podłączania urządzeń pomiarowych: odpowiedników kart pomiarowych i kart interfejsowych (NI USB-6009, NI USB-9219, NI USB-8473s). Zwykle komputer osobisty wyposażony jest w co najmniej kilka gniazd USB (4-8) – nieco mniej gniazd mają komputery przenośne (2-3). Magistrala USB składa się z głównego koncentratora (root hub), koncentratorów USB, które rozdzielają i wzmacniają sygnał. W razie potrzeby kolejne koncentratory mogą być instalowane w gniazdach USB tak jak wszystkie urządzenia (rys 5.2).



Rys. 5.2. Struktura połączeń elementów podłączanych do magistrali USB [31]

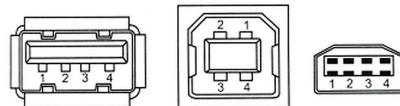
Najistotniejsze cechy magistrali USB:

- możliwość podłączenia i odłączenia bez restartu systemu operacyjnego,

- b) duża szybkość transmisji danych (do 480 Mb/s – USB 2.0),
- c) możliwość zasilania podłączonych urządzeń napięciem 5V przy całkowitej obciążalności do 0,5 A,
- d) możliwość podłączenia do 127 urządzeń,
- e) jeden typ kabla (4 żyły: dwie do transmisji sygnału i dwie do zasilania) kilka standardowych złącz (rys. 5.3),
- f) maksymalna długość kabla do 5 m,
- g) jedna przestrzeń adresowa USB,
- h) jeden typ przerwań,
- i) praca magistrali „obciąża” procesor.

W 2008 r. przyjęto standard USB 3.0 oferujący wyższe szybkości transferu danych (do 4,8 Gb/s), co uzyskano dzięki zwiększeniu ilości przewodów sygnalowych do 4. Urządzenia pomiarowe wykorzystujące ten nowy standard nie są jednak jeszcze zbyt licznie oferowane.

Oferta urządzeń pomiarowych, które można podłączyć do magistrali USB 2.0 jest stale poszerzana i obejmuje oprócz takich urządzeń jak oscyloskopy (NI USB-5133), i multimetry cyfrowe (NI USB-4065 USB DMM) również różne urządzenia o funkcjonalności odpowiadającej kartom dołączanym do magistrali PCI (NI USB-6255, NI USB-8473).



Rys. 5.3. Złącza magistrali USB (1-zasilanie 5V; 2,3-linie sygnałowe, 4-masa) [31]

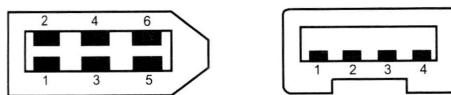
Magistrala szeregową Fire Wire została opracowana w firmie Apple Computer i stąd pochodzi jej nazwa. W komputerach osobistych od połowy lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku funkcjonuje pod nazwą interfejsu IEEE-1394 (firma Apple jest nadal wierna własnej nazwie). Funkcjonalnie jest zbliżona do magistrali USB, jednak z uwagi na większą szybkość transmisji, jest przeznaczona do podłączania urządzeń wymagających dużych szybkości transmisji. Najważniejsze cechy tej magistrali to:

- a) możliwość podłączenia i odłączenia bez restartu systemu operacyjnego,
- b) duża szybkość transmisji danych (do 800 Mb/s dla wersji IEEE-1394b),
- c) możliwość zasilania podłączonych urządzeń napięciem do 30 V przy całkowitej obciążalności do 1,5 A,
- d) możliwość podłączenia do 63 urządzeń,
- e) jeden typ kabla (6 żył: 4 do transmisji sygnału i 2 do zasilania), kilka standardowych złącz (rys. 5.4),

- f) maksymalna długość pojedynczego kabla do 4,5 m i do 16 urządzeń połączonych szeregowo,
- g) jedna przestrzeń adresowa,
- h) jeden typ przerwań,
- i) praca magistrali nie „obciąża” procesora.

Magistrala Fire Wire (IEEE-1394) nie musi mieć urządzenia nadzorującego (kontrolera) – wszystkie urządzenia podłączone do magistrali mają takie same możliwości dostępu do magistrali i wymiany danych.

Standard IEEE-1394b przewiduje również wykorzystanie w przyszłości połączeń optycznych (światłowód jako przewód transmisyjny, co umożliwi transfer 3,2 Gb/s i zwiększenie długości przewodów ponad 100 m.



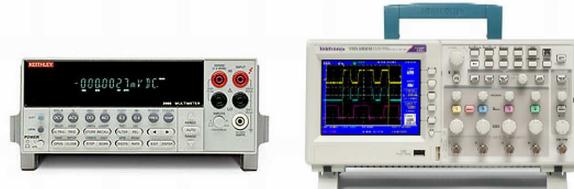
Rys. 5.4. Złącza do urządzeń IEEE-1394 (wersja 4- i 6-cio przewodowa, dla złącza sześciostykowego: 1-zasilanie, 2-masa, 3-6-linie sygnałowe) [32]

5.1. Przyrządy wirtualne i karty pomiarowe do komputerowych systemów pomiarowych

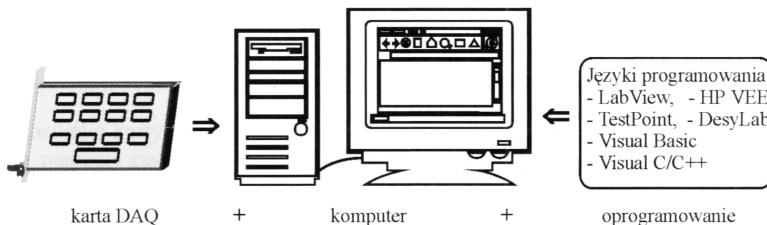
Elementami systemu komputerowego są często specjalizowane urządzenia przeznaczone do realizacji konkretnych, często specjalizowanych zadań: oscyloskop, kondycjonery, przetworniki A/C i C/A, analizator sygnałów, multimetr cyfrowy, generator itd. (rys. 5.5). Ich podstawową wadą jest zamknięta konfiguracja, ograniczona do pierwotnej funkcjonalności, niekiedy możliwa jest aktualizacja lub zmiana oprogramowania sterującego. Interfejs użytkownika tworzy najczęściej panel frontowy urządzenia wyposażony w pokrętła, przyciski oraz urządzenia wskazujące, zwykle jego modyfikacja nie jest możliwa. Stosowanie takich urządzeń ma niezaprzeczalne zalety, zwłaszcza gdy takie urządzenia są już w posiadaniu eksperymentatora, wadą jest często utrudniona budowa systemu pomiarowego na bazie takich urządzeń, gdy jego struktura jest bardziej rozbudowana. Dodatkowym utrudnieniem, zwłaszcza w przypadku badań poza laboratorium (in-situ), jest zapewnienie zasilania każdego z urządzeń, co wiąże się chociażby z większą ilością przewodów, ponadto mamy do transportu i obsługi co najmniej kilka urządzeń co nie zawsze jest wygodne.

Alternatywą jest stosowanie tak zwanych wirtualnych przyrządów pomiarowych, których struktura pokazana jest na rysunku 5.6. Przyrząd wirtualny to urządzenie realne, a nazwa ta wynika z dominującej roli oprogramowania i komputera. Obok tego, w skład przyrządu wirtualnego wchodzą instalowane w obudowie komputera lub

podłączane przewodami karty pomiarowe, sterujące, interfejsowe i in. Panel do obsługi przyrządu wirtualnego tworzy okno aplikacji pomiarowej o funkcjonalności dostosowanej do potrzeb użytkownika.



Rys. 5.5. Panele frontowe specjalizowanych urządzeń pomiarowych: oscyloskopu cyfrowego TDS2000C [23] i multimetru cyfrowego (Model 2000 6½-Digit Multimeter) [20]



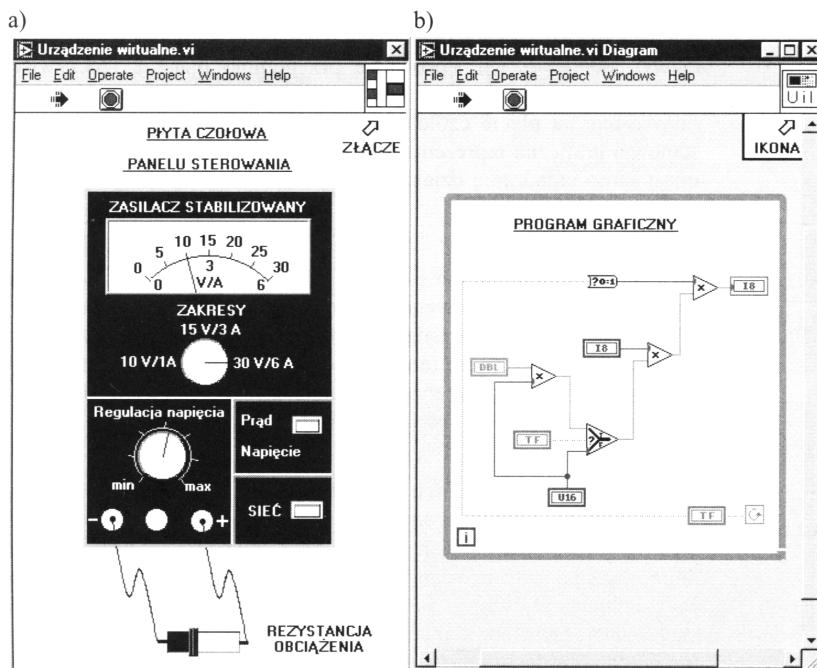
Rys. 5.6. Struktura wirtualnego przyrządu pomiarowego [31]

Przyrząd wirtualny nie zastępuje potrzebnych elementów systemu pomiarowego, takich jak kondycjonery do czujników (np.: temperatury), kondycjonery dopasowujące sygnały pomiarowe do zakresów pomiarowych urządzeń pomiarowych (kart pomiarowych), karty z filtrami dolnoprzepustowymi i in. Często możliwe jest zbudowanie systemu pomiarowego niejako wewnątrz komputera osobistego, umieszczając pochodzące karty w gniazdach magistrali PCI lub PCI Express. Integruje całość oprogramowanie, które zawiera sterowniki do wszystkich urządzeń systemu, umożliwia konfigurację i obsługę tych urządzeń. Panel frontowy przykładowego urządzenia wirtualnego, zrealizowany w programie LabVIEW przedstawiono na rysunku 5.7. Funkcjonalność przyrządu pomiarowego wynika z cech interfejsu użytkownika, który z kolei jest stosunkowo łatwo modyfikować. Oprogramowanie wirtualnego urządzenia pomiarowego to nie tylko interfejs użytkownika, ma ono istotny wpływ na parametry metrologiczne urządzenia wirtualnego, z uwagi na możliwość przetwarzania on-line wielkości mierzonych: filtracja, uśrednianie, analiza widma sygnału itp.

Ważnymi elementami wirtualnych przyrządów pomiarowych są karty pomiarowe., oznaczane często skrótem DAQ (Data Aquisition Card), umieszcza się je bezpośrednio w komputerze (magistrale PCI, PCIEpress) lub podłącza, przy pomocy

przewodów, do magistral szeregowych (USB, IEEE-1394). W zależności od przeznaczenia i budowy, realizują cały szereg funkcji:

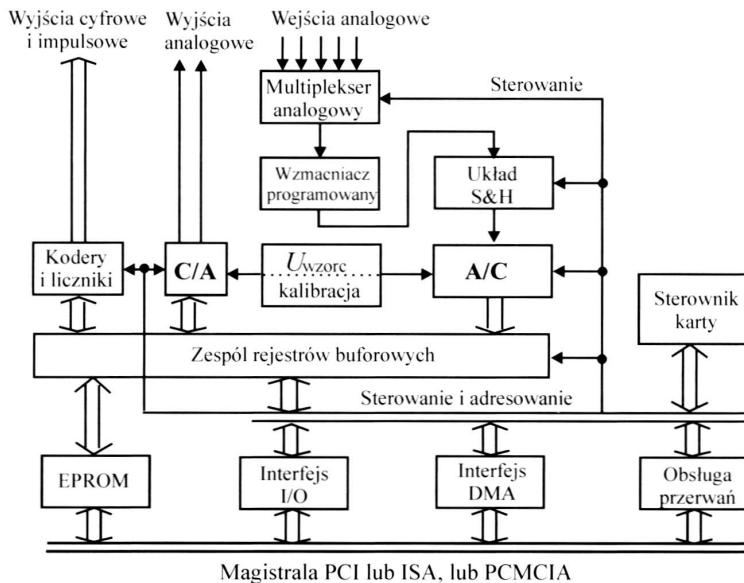
- a) multipleksowanie sygnałów,
- b) przetwarzanie analogowo-cyfrowe,
- c) filtracja analogowa antialiasingowa sygnału wejściowego,
- d) ustawianie poziomów i czasów dla sygnału na wejściu analogowym,
- e) generowanie żądanych sygnałów na wyjściach analogowych,
- f) pomiar częstotliwości sygnału wejściowego,
- g) odczyt i zapis sygnałów cyfrowych.



Rys. 5.7. Wirtualny zasilacz stabilizowany: a) panel frontowy, b) program w języku G zrealizowany w LabVIEW [43]

Uproszczoną strukturę karty pomiarowej DAQ przedstawiono na rysunku 5.8. Wielofunkcyjna karta DAQ składa się z szeregu bloków funkcjonalnych: multipleksera analogowego, wzmacniacza programowalnego, układu próbkującąco-pamiętającego, przetwornika A/C, przetwornika C/A, układu kalibracji, rejestrów i układów pamięci. Duże szybkości działania uzyskują karty wyposażone w interfejs DMA (ang. Direct Memory Access), który pozwala na szybki dostęp do pamięci z pominięciem procesora. Karty wielofunkcyjne umożliwiają pomiary wielokanałowe, mogą pełnić funkcje generatora funkcyjnego, oscylometru

i multimetru cyfrowego. Ważną zaletą kart instalowanych we wnętrzu komputera jest to, że nie zajmują dodatkowego miejsca.



Rys. 5.8. Uproszczona struktura karty pomiarowej DAQ [32]

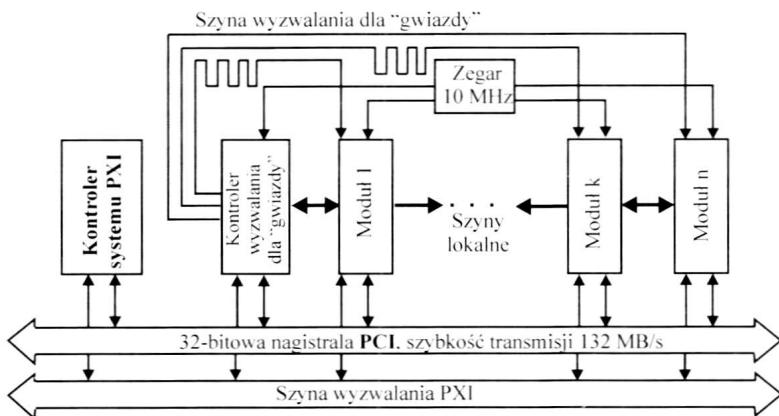
Z punktu widzenia użytkownika istotne są następujące parametry kart pomiarowych:

- liczba wejść analogowych (kanałów) oraz ich rodzaj: wejścia różnicowe DI lub niesymetryczne SE,
- liczba wyjść analogowych,
- rozdzielcość przetwornika analogowo-cyfrowego (i przetwornika C/A) dana liczbą bitów słowa cyfrowego,
- największa częstotliwość próbkowania,
- zakres pomiarowy i rozdzielcość bezwzględna,
- dokładność pomiaru,
- pojemność pamięci EPROM na karcie,
- magistrala w komputerze, do której podłącza się kartę,
- dostępność bibliotek (C/C++, Pascal, assembler) i sterowników.

5.2. Modułowe systemy pomiarowe

Szybka transmisja danych wymaga równoległych interfejsów komunikacyjnych i jak najkrótszych odległości pomiędzy urządzeniami. Oba te czynniki występują

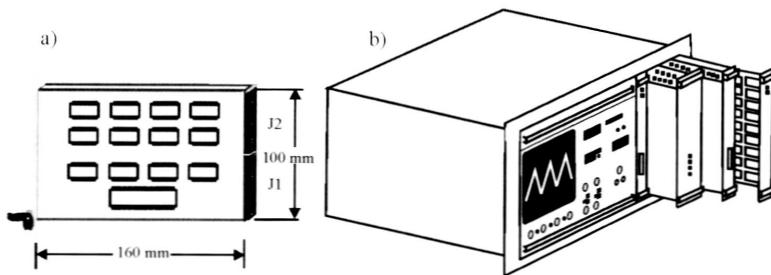
w kasetowych i modułowych systemach pomiarowych. Systemy kasetowe (CAMAC, VXI) złożone są z kaset mocowanych w specjalnych stojakach, a w kasetach instalowane są specjalizowane moduły z blokami funkcjonalnymi, odległość miedzy kasetami zwykle nie przekracza 50 cm. Systemy kasetowe wyposażane są w moduły dedykowane tylko do tych systemów, co z jednej strony dobrze wpływa na parametry systemów, ale z drugiej czyni je systemami specjalizowanymi i również drogimi. System CAMAC [31] jest już przestarzały i zastępowany nowszym systemem VXI [31]. Szybkość transmisji danych w tym systemie sięga 40 MB/s i jest on wykorzystywany w technice nuklearnej oraz wojskowej. System ma hierarchiczną budowę: w systemie funkcjonują kasety złożone z modułów zawierających najczęściej pojedyncze urządzenia podłączone do magistrali systemowej.



Rys. 5.9. Magistrala systemu modułowego PXI [31]

Kosztowne systemy kasetowe, ze względu na swoją specyfikę (i cenę) znajdują ograniczone zastosowanie. Alternatywą może być modułowy system pomiarowy PXI. Budowa systemu bazuje na popularnej w komputerach osobistych magistrali PCI (również PCIEexpress). Organizacja przepływu sygnałów w systemie PXI jest przedstawiona na rysunku 5.9. Moduły systemu PXI są elementami o wymiarach Eurokarty o wymiarach: 160x100 mm (3U) i 160x233 mm (6U). Moduły umieszcza się gniazdach obudowy (rys. 5.10). Każdy moduł ma dwa złącza – jedno do transferu danych po magistrali PCI (J1) i drugie do transferu sygnałów (zegarowych, synchronizacji) magistrali PCI (J2). Obudowy są oferowane w różnych wielkościach i konfiguracjach. Zwykle w obudowie jedno gniazdo zajmuje moduł kontrolera, który jest tak naprawdę komputerem PC wyposażonym we wszystkie typowe elementy (procesor, dysk twardy, pamięć, interfejsy komunikacyjne: USB, Ethernet, a także wyjścia do podłączenia monitora – jeśli jest używany). Należy tutaj dodać, że po spełnieniu pewnych warunków obudowa PXI z kontrolerem i modułami może pełnić

rolę komputera przemysłowego i pracować w trudniejszych niż laboratoryjne warunki. Są również dostępne obudowy przenośne, ułatwiające badania in-situ.



Rys. 5.10. Moduł PXI o wymiarach 3U i obudowa PXI z wyświetlaczem [31]

Oferta modułów pomiarowych jest bardzo szeroka i obok firmy National Instruments, która od lat silnie wspiera ten standard, również inni producenci mają wśród swoich produktów moduły PXI (np.: firma Agilent Technologies). Firma National Instruments oferuje najczęściej podobne produkty na szynę PCI (do komputerów osobistych) i moduły PXI. Oferta obejmuje: wielofunkcyjne karty pomiarowe DAQ (NI PXI-6229), generatory sygnałów (NI PXI-5411), multimeter (NI PXI-4060), multiplexery (NI PXI-2591), przetworniki A/C (NI PXI-5112).

Komputery w systemie modułowym PXI pracują zwykle pod kontrolą systemów operacyjnych MS Windows, choć niektóre wymagające systemy pomiarowe mogą potrzebować systemu operacyjnego pracującego w czasie rzeczywistym.

Należy na koniec dodać, że system modułowy PXI po wyposażeniu odpowiednie oprogramowanie świetnie nadaje się do realizacji nawet bardzo złożonych przyrządów wirtualnych o funkcjonalności i parametrach nieosiągalnych dla systemów pomiarowych wykorzystujących specjalizowane urządzenia pomiarowe.

5.3. Programy komputerowe w systemach pomiarowych

W większości systemów pomiarowych z kontrolerem w postaci komputera osobistego istotną rolę odgrywa oprogramowanie wspierające pracę eksperymentatora. W najprostszych systemach, gdzie mamy jedno proste urządzenie (np.: multimeter cyfrowy) podłączone do komputera poprzez standardowy interfejs (szeregowy: RS232C, USB lub równoległy: Centronics) można wykorzystać programy zwykłe dostarczane przez producentów sprzętu. Są one zwykle dosyć proste, umożliwiające konfigurację urządzenia, prostą wizualizację i ewentualnie rejestrację wyników. W bardziej złożonych systemach pomiarowych, gdy wykorzystujemy więcej różnych urządzeń lub gdy liczba torów pomiarowych jest duża, zapanowanie nad taką strukturą, przyjazne konfigurowanie i identyfikacja (najlepiej automatyczna)

elementów toru pomiarowego wymaga bardziej złożonej aplikacji. Programy wspierające realizację pomiarów w komputerowym systemie pomiarowym powinny spełniać co najmniej następujące wymagania:

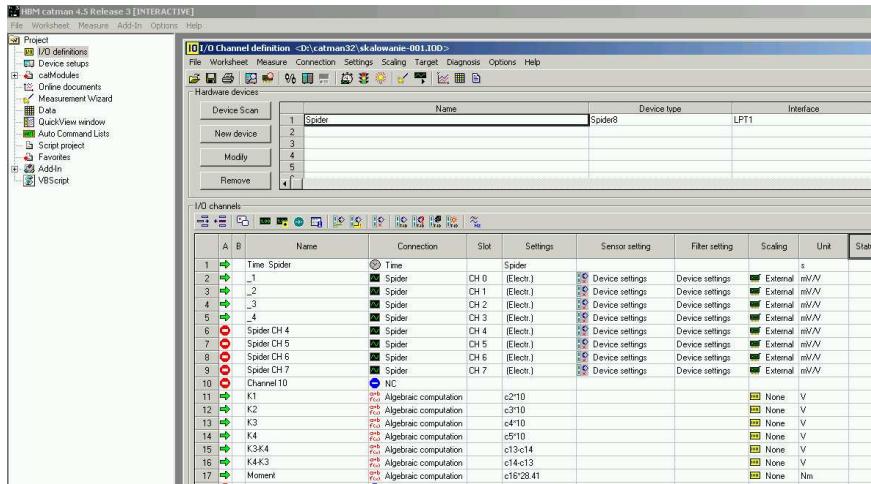
- umożliwiać konfigurację urządzeń pomiarowych,
- umożliwiać wizualizację (najlepiej w różny sposób) i ocenę pomiaru bezpośrednio (on-line),
- wspierać tworzenie raportów dokumentujących wyniki pomiaru,
- zawierać funkcje i procedury do analizy i przetwarzania danych,
- w sposób uporządkowany gromadzić dane i umożliwiać zarządzanie nimi,
- umożliwiać export i import danych (plików) z wykorzystaniem formatów uniwersalnych (np.: ASCII).

Zwykle stosuje się w takich przypadkach jedno z trzech rozwiązań: korzysta się z gotowych programów umożliwiających mniej lub bardziej łatwe tworzenie aplikacji (LabVIEW firmy National Instrument, VEE firmy Agilent Technologies, TestPoint firmy Keithley, DasyLab firmy Dasytec), wykorzystuje się programy przygotowane wprost do realizacji pomiarów (Catman firmy Hotinger Baldwin Messtechnik) lub też tworzy się aplikację korzystając z języków wysokiego poziomu (C/C++, Pascal, Visual Basic). Producenci sprzętu zwykle dostarczają na potrzeby użytkowników biblioteki zawierające zarówno sterowniki do najbardziej znanych pakietów oprogramowania (LabVIEW, TestPoint) oraz języków wysokiego poziomu (C/C++). Aplikacje tworzone w językach wysokiego poziomu, przy niezbyt rozbudowanych algorytmach przetwarzania wielkości mierzonych, są często mniejsze i działają szybciej. Ten sposób tworzenia aplikacji stosuje się również przy tworzeniu systemów obsługujących bardzo złożony obiekt lub proces, a także gdy docelowy użytkownik wymaga funkcjonalności aplikacji, których nie można zrealizować w wymienionych wcześniej systemach, np.: wymagana jest realizacja zadań w czasie rzeczywistym, czego aplikacje przewidziane dla systemu Windows nie są w stanie zapewnić.

Wymienione wcześniej programy (systemy) można podzielić na co najmniej dwie grupy różniące się z jednej strony złożonością i wymaganiami w stosunku do użytkownika a z drugiej strony oferowanymi możliwościami:

- a) Programy przeznaczone do wspierania eksperymentatora poprzez zaoferowanie gotowych procedur przeznaczonych do konfiguracji obsługiwanych urządzeń, wizualizacji i obróbki zmierzonych wielkości. Przykładem takiej aplikacji jest program Catman firmy Hotinger Baldwin Messtechnik (HBM). Przeznaczony jest on głównie do współpracy z produktami (wzmacniaczami pomiarowymi) oferowanymi przez HBM. Szereg procedur zgrupowanych w tzw. drzewie (rys. 5.11), pozwala na realizację poszczególnych etapów pracy użytkownika poprzez konfigurację obsługiwanej urządzenia, konfigurację parametrów przetworników pomiarowych, wybór sposobu wizualizacji i rejestracji wielkości mierzonych. W wersji profesjonalnej (istnieje również wersja uproszczona, Catman Easy) użytkownik ma dość bogaty zbiór funkcji matematycznych do obróbki

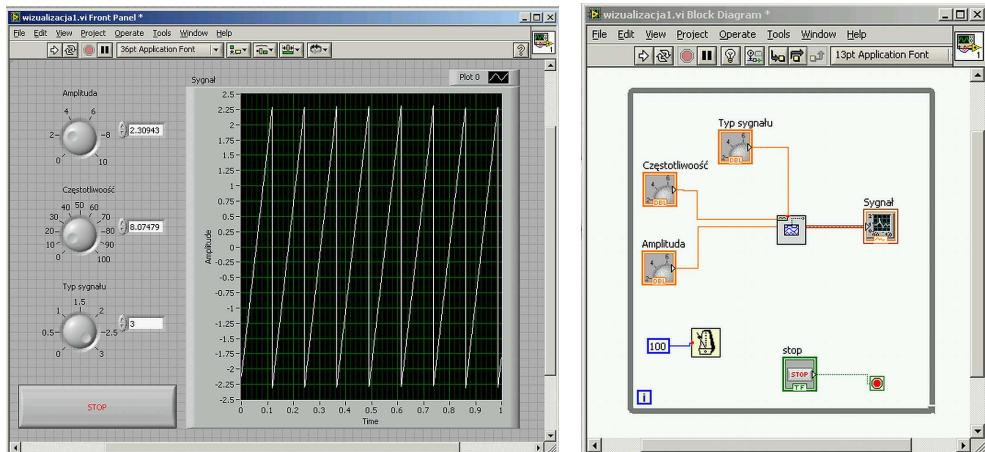
wielkości mierzonych zarówno on-line, w trakcie pomiarów, jak i po ich zarejestrowaniu. Oprócz tego jest możliwość poszerzenia funkcjonalności programu dzięki możliwości tworzenia skryptów w ramach funkcji programu a także tworzenia rozszerzeń z wykorzystaniem skryptów języka VisualBasic for Application.



Rys. 5.11. Podstawowe okno programu Catman (HBM) z charakterystycznym drzewem procedur i oknem użytkownika [4]

- b) Uniwersalne środowiska do tworzenia aplikacji oferują bardzo bogatą gamę funkcji i procedur umożliwiających realizację nawet bardzo złożonych zadań przy realizacji pomiarów: bogaty zestaw funkcji do obróbki wyników pomiarów zarówno on-line jak i po pomiarach, duże możliwości wizualizacji wielkości mierzonych, duża biblioteka sterowników do urządzeń pomiarowych, obsługa większości popularnych interfejsów komunikacyjnych, narzędzia do konfiguracji obsługiwanych urządzeń pomiarowych. Bardzo ważną cechą takich środowisk jest sposób tworzenia aplikacji, który polega na budowie diagramu funkcjonalnego z gotowych bloków, które reprezentują poszczególne urządzenia i funkcje służące do obróbki sygnałów. Dobrym przykładem jest pakiet LabVIEW firmy National Instruments, w którym do tworzenia aplikacji został zaimplementowany graficzny język programowania (zwany językiem G), który umożliwia projektowanie i konstruowanie urządzeń wirtualnych stosowanych w komputerowych systemach pomiarowych służących do zbierania danych, ich przetwarzania, analizy i wizualizacji a także sterowania procesami i pomiarami. Programowanie w tym języku polega właściwie na blokowym przedstawianiu operacji (i obiektów) z których składa się program i logicznego powiązania ich między sobą. Pakiet LabVIEW jest dziś ogromnym pakietem, którego możliwości daleko wykraczają

poza wspomaganie pomiarów, np.: oferuje on narzędzia do sterowania, analizy obrazów, analizy sygnałów itd. Tworzenie aplikacji odbywa się równolegle w dwóch oknach: panelu frontowym, w którym tworzy się interfejs użytkownika wyposażony w kontrolki, przyciski, wskaźniki cyfrowe i graficzne oraz okno diagramu blokowego w którym składa się z ikon przedstawiających bloki funkcjonalne oraz połączenia między blokami (rys. 5.12). Taki sposób tworzenia aplikacji odzwierciedla algorytm i przepływ informacji w systemie.

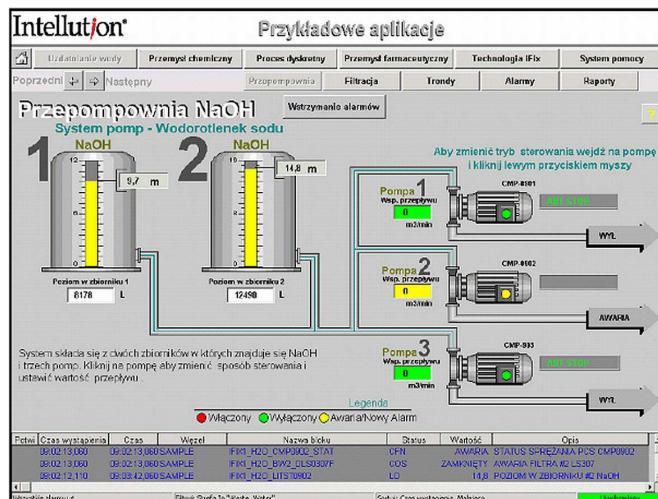


Rys. 5.12. Okno panelu frontowego z prostym interfejsem użytkownika oraz okno diagramu blokowego dla aplikacji w LabVIEW spełniającej funkcje prostego generatora

Szerszy opis pakietu LabVIEW wymagałby osobnego opracowania, więc zainteresowani mogą sięgnąć do dokumentacji programu lub literatury, która z uwagi na popularność pakietu jest nad wyraz bogata, zarówno w języku angielskim [44, 2] jak i polskim [42, 13, 5]. Nie należy zapominać o Internecie, jako źródle informacji, zwłaszcza tych najbardziej praktycznych. Pomocne mogą być tutaj tematyczne serwisy internetowe poświęcone LabVIEW. Dobrym przykłady to strona WWW producenta [21] oraz forum „Polskie Centrum LabVIEW” (<http://www.labview.pl>), który jest tak naprawdę forum do wymiany informacji, a porad udzielają często doświadczeni użytkownicy i twórcy aplikacji w LabVIEW.

Należy również w tym miejscu wspomnieć o aplikacjach typu SCADA (ang. Supervisory Control And Data Acquisition), które czasem są wykorzystywane do realizacji pomiarów. Ich głównym przeznaczeniem jest nadzór przebiegu procesu technologicznego lub produkcyjnego. Systemy te pełnią rolę nadzorującą w stosunku do sterowników PLC i innych urządzeń, które są bezpośrednio połączone z urządzeniami wykonawczymi i pomiarowymi i realizują algorytmy sterowania czy też funkcje pomiarowe. Systemy typu SCADA są odpowiedzialne za zbieranie danych (wielkości

mierzone, stan obiektów) ich wizualizację (rys. 5.13), sterowanie procesem, alarmowanie i archiwizację danych.



Rys. 5.13. Przykładowy panel wizualizacyjny programu typu SCADA

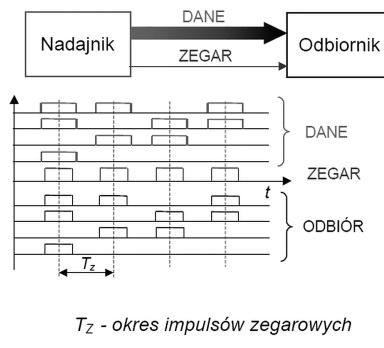
6. Interfejsy pomiarowe

Dane cyfrowe w komputerowych systemach pomiarowych mogą być przesyłane szeregowo lub równolegle. Transmisja szeregowa to przesyłanie danych bit po biegu zgodnie z taktami zegara synchronizującego. Transmisja równoległa to przesyłanie ciągu słów (długość słowa – ilość bitów zależy od przyjętego standardu), kolejno słowo po słowie synchronicznie lub asynchronicznie. Komputerowe systemy pomiarowe z szeregową transmisją danych (z interfejsem szeregowym) mogą służyć do budowy prostego systemu pomiarowego składającego się z dwóch urządzeń, np.: komputera osobistego i podłączonego do złącza RS-232C urządzenia pomiarowego. W każdym komputerze osobistym, z zainstalowanym popularnym systemem operacyjnym, jest zainstalowany sterownik do obsługi interfejsu szeregowego RS-232C. Większość urządzeń pomiarowych ma zaimplementowaną obsługę tego interfejsu, co pozwala w prosty sposób przesyłać dane z urządzenia i instrukcje sterujące z komputera do urządzenia. Gdy potrzebny jest system złożony z większej liczby urządzeń to najlepiej skorzystać z interfejsów szeregowych, które zostały opracowane z myślą o transferach danych w systemach pomiarowych, np.: RS-485. Aby możliwe było wykorzystanie tego interfejsu, niezbędne jest zainstalowanie specjalnej karty rozszerzającej (karty interfejsowej) ze sterownikiem do obsługi, podobnie podłączane urządzenia muszą obsługiwać ten sposób transmisji. Interfejsy szeregowe są często wykorzystywane do wymiany danych i rozkazów pomiędzy sensorami zintegrowanymi (lub inteligentnymi) a resztą układu, np.: procesorem lub mikrokontrolerem.

6.1. Metody koordynacji transmisji informacji

6.1.1. Transmisja synchroniczna

Nadawanie i odbieranie poszczególnych znaków słowa odbywa się w określonych przedziałach czasu, np. synchronicznie z taktem zegara (rys. 6.1). Zaletą jej jest prostota, wadami konieczność jednakowej i stałej szybkości nadawania i odbioru informacji przez jednostki funkcjonalne systemu, brak pewności, czy nadana informacja została odebrana przez odbiorcę, wrażliwość na zakłócenia impulsowe na linii synchronizacji.



Rys. 6.1. Schemat synchronicznej transmisji danych

6.1.2. Transmisja asynchroniczna

Poszczególne znaki lub słowa wysyłane mogą być w dowolnych odstępach czasowych, ale dzięki sygnalizowaniu początku i końca transmisji każdego słowa następuje synchronizacja nadawania i odbioru w uczestniczących w transmisji jednostkach systemu.

Odmiany transmisji asynchronicznej:

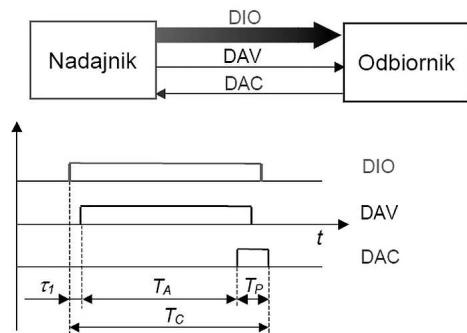
- metoda „START-STOP” (bez potwierdzenia) stosowana w transmisji szeregowej,
- przesyłanie z potwierdzeniem (handshake) dwuprzewodowym,
- przesyłanie z potwierdzeniem (handshake) trójprzewodowym.

Zaletą transmisji asynchronicznej jest dostosowanie szybkości transmisji do możliwości współpracujących bloków funkcjonalnych. W przypadku transmisji bez potwierdzenia odbioru następuje dopasowanie szybkości odbioru do szybkości nadawania. W przypadku transmisji z potwierdzeniem następuje również dopasowanie szybkości nadawania do możliwości odbiorcy. Dzięki sygnalizowaniu przez odbiorcę nadawcy odebrania każdego wysyłanego słowa znacznie zwiększa się poprawność transmisji.

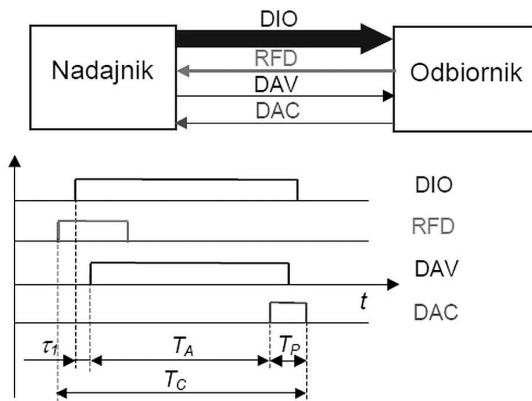
Transmisja asynchroniczna z potwierdzeniem dwuprzewodowym (rys. 6.2) umożliwia optymalne pod względem czasowym przesyłanie informacji między nadajnikiem i jednym odbiornikiem. Jeżeli w transmisji uczestniczy więcej odbiorników, mogą wystąpić zakłócenia spowodowane różnicą ich właściwości dynamicznych.

W systemach, w których równocześnie może być czynna większa liczba odbiorników stosuje się trójprzewodową odmianę metody z potwierdzeniem (rys. 6.3)

Metodę tę stosuje się m.in. w interfejsie GPIB (IEC-625/IEEE-488) będącym ogólnoświatowym standardem interfejsu pomiarowego.



Rys. 6.2. Schemat transmisji asynchronicznej z potwierdzeniem dwuprzewodowym
 DIO - szyna danych (Data Input Output), DAV - dane ważne (DAta Valid), DAC - dane odebrane (Data ACcepted), TA - czas aktywnej transmisji danych, Tc - czas trwania cyklu przesyłania, TP - czas przetwarzania w odbiorniku



Rys. 6.3. Schemat transmisji asynchronicznej z potwierdzeniem trójprzewodowym
 DIO - szyna danych (Data Input Output), RFD - gotowy do odbioru danych (Ready For Data), DAV - dane ważne (DAta Valid), DAC - dane odebrane (Data ACcepted)

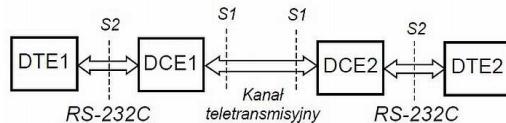
6.2. Interfejsy szeregowe

Najczęściej stosowane w systemach pomiarowych standardy interfejsów szeregowych: RS-232C, RS-449, RS-422A, RS-423A, RS-530, RS-485, HART, IEC 1158-2, PROFIBUS, MicroLAN, CAN.

6.2.1. Interfejs szeregowy RS-232C

System interfejsu szeregowego RS-232 (ang. Recommended Standard) z 1962 r. definiuje sposób nawiązania i przeprowadzenia łączności między dwoma urządzeniami końcowymi (terminalami) DTE (ang. Data Terminal Equipment). Każde

z dwóch urządzeń DTE jest połączone z linią telefoniczną za pomocą modemu (rys. 6.4) , oznaczonego symbolem DCE (ang. Data Communication Equipment). System RS-232C (1969r.) jest standardem interfejsu szeregowego do wymiany informacji cyfrowych między urządzeniami DTE.



Rys. 6.4. Struktura układu transmisyjnego z interfejsem RS-232C [48]

Kabel interfejsu RS-232C jest zakończony standardowym gniazdem 25-stykowym typu DB-25P Canon lub gniazdem 9-stykowym typu DB-9. Drugi koniec kabla posiada wtyk 25- lub 9-stykowy. Urządzenia DTE mają na obudowie złącza typu wtyk (z bolcami) a urządzenia DCE złącza typu gniazdo (z otworami).

Magistrala interfejsu RS-232C zawiera:

1. 4 linie danych:
 - TxD - dane nadawane (ang. Transmitted Data),
 - RxD - dane odbierane (ang. Received Data),
 - STxD - dane nadawane w kanale powrotnym (secondary channel),
 - SRxD - dane odbierane w kanale powrotnym.
2. 11 linii sterujących:
 - DTR (ang. Data Terminal Ready) - gotowość terminalu DTE do dalszej współpracy z DCE,
 - DSR (ang. Data Set Ready) - gotowość modemu DCE do dalszej współpracy z terminaliem DTE,
 - RTS (ang. Request To Send) - żądanie nadawania danych zgłoszane przez terminal DTE,
 - CTS (ang. Clear To Send) - gotowość do nadawania zgłoszana przez modem DCE terminalowi DTE,
 - DCD (ang. Data Carrier Detected) - sygnał wykrycia przez modem DCE1 fali nośnej modemu odległego DCE2 - tą linią modem DCE1 przekazuje terminalowi DTE1 sygnał o nawiązaniu połączenia z DCE2,
 - SQD (ang. Signal Quality Detector) - sygnał od modemu DCE1 do terminalu DTE1, informujący czy transmisja danych z DCE2 do DCE1 przebiega bez zakłóceń,
 - SRTS, SCTS, SRLSD - sygnały sterujące transmisją w kanale powrotnym - odpowiedniki sygnałów sterujących w kanale głównym: RTS, CTS i DCD,
 - CH/CI - wybór szybkości transmisji przez terminal DTE, przełączanie między dwiema szybkościami transmisji,

- RI (ang. Ring Indicator) - wskaźnik wywołania - DCE1 informuje DTE1 o odebraniu wywołania od DCE2.
3. 3 linie synchronizacji:
- DA - sygnał podstawy czasu wytworzony w DTE, do taktowania nadawania danych przez DTE na linii TxD,
 - DB - sygnał podstawy czasu wytworzony w DCE, do taktowania nadawania danych przez DCE na linii TxD,
 - DD - sygnał podstawy czasu wytworzony w DCE, do taktowania odbierania danych przez DTE na linii RxD.

4. 2 linie masy:

- SG (ang. Signal Ground) - masa sygnałowa,
- PG (ang. Protective Ground) - masa ochronna.

Wszystkie linie (oprócz linii masy) są jednokierunkowe. Na liniach danych obowiązuje logika ujemna, a na sterujących dodatnia. Dopuszczalna długości magistrali RS-232C wynosi 15m. natomiast dopuszczalne napięcia na liniach to:

- stan niski: $-15 \text{ V} \leq U \leq -3 \text{ V}$,
- stan wysoki: $+3 \text{ V} \leq U \leq +15 \text{ V}$.

W systemie interfejsu RS-232C wyróżnić można następujące rodzaje transmisji ze względu na kierunek przepływu danych między terminalami DTE1 i DTE2:

- simpleks – jednokierunkowa - przekazywanie danych tylko od DTE1 do DTE2 lub tylko odwrotnie,
- półdupleks – dwukierunkowa, ale nie jednocześnie – umożliwia naprzemienne przesyłanie danych w obydwóch kierunkach (rys. 6.5),
- dupleks – dwukierunkowa jednocześnie – umożliwia jednocześnie przesyłanie danych w obydwóch kierunkach.

Do transmisji danych w sposób dupleksowy lub półdupleksowy wystarcza zwykle jeden kanał transmisyjny i dwie linie danych: TxD oraz RxD.

Transmisja danych w systemie interfejsu RS-232C polega na szeregowym przesyłaniu kolejnych bitów. Rozróżnia się dwa rodzaje transmisji:

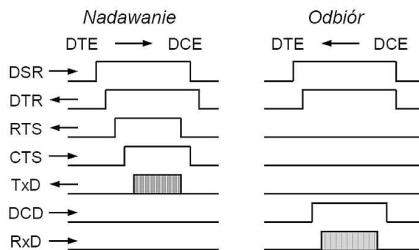
- asynchroniczną znakową,
- synchroniczną.

Transmisja asynchroniczna znakowa (rys. 6.6) polega na kolejnym przesyłaniu znaków (alfanumerycznych i sterujących), przy czym każdy znak danych zawiera od 5 do 8 bitów i jest poprzedzony bitem START, a zakończony bitem kontrolnym i bitami STOP. Bity danych wraz z bitem kontrolnym i bitami synchronizacji (startu i stopu) tworzą jednostkę informacyjną SDU (ang. Serial Data Unit).

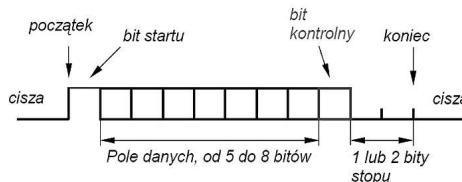
Odwrotność czasu trwania jednego bitu określa szybkość transmisji w bitach na sekundę. W prostych metodach modulacji $1\text{b/s} = 1\text{bod}$.

Transmisja synchroniczna polega na przekazywaniu znaków zgrupowanych w bloki zwane ramkami, o zawartości do 2 kilobajtów (KB). Cechy transmisji synchronicznej:

- jednakowa częstotliwość sygnałów taktujących (zegarowych) w nadajniku i odbiorniku,
- transmisja danych w jednostkach zwanych ramkami, zmiennej objętości, z wyróżnieniem początku i końca ramki,
- wykrywanie i ewentualna korekcja błędów transmisji,
- automatyczna retransmisja sekwencji danych błędami ARQ (ang. Automatic Repeat reQuest).



Rys. 6.5. Przebiegi sygnałów między DTE i DCE przy transmisji półdupleksowej [48]



Rys. 6.6. Format jednostki informacyjnej w transmisji asynchronicznej znakowej [48]

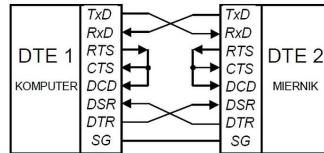
Podczas transmisji synchronicznej w RS-232C zwykle nie ma impulsów synchronizacyjnych przekazywanych równolegle do bitów danych. Częstotliwość zegara w odbiorniku uzyskuje się z fali nośnej odbieranego sygnału w układzie synchronizacji elementowej.

Ramka informacji składa się z nagłówka ramki, segmentu danych i sekwencji końca ramki. Sekwencja końca ramki zawiera zawsze pole kontrolne wykorzystywane do detekcji błędów. Znaki są transmitowane szeregowo, bez oddzielnych bitów identyfikujących początek lub koniec znaku.

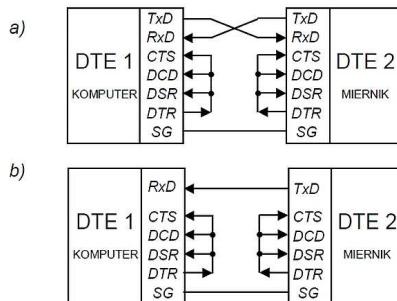
Transmisja danych pomiarowych w systemie interfejsu RS-232C na znacznie większą odległość (do 1500 m) jest możliwa dzięki zastosowaniu układu „pętli prądowej 20 mA” (ang. 20 mA loop). W pętli prądowej każda linia magistrali interfejsu jest zastąpiona przez kabel dwuprzewodowy, którym jest transmitowany sygnał cyfrowy zgodnie z konwencją: 1 logiczna to prąd 20 mA w linii, 0 logiczne to brak prądu w linii. Dopuszczalna szybkość transmisji w systemie z pętlą prądową zależy od długości i jakości linii transmisyjnej i wynosi od 38 kb/s dla linii 500 m do 9600 b/s dla linii 4 km.

Bezpośrednie połączenie dwóch urządzeń DTE bez modemów nazywamy systemem modemu zerowego (rys. 6.7 i 6.8). Przy łączaniu wyprowadzeń interfejsu RS-232C obowiązują następujące zasady:

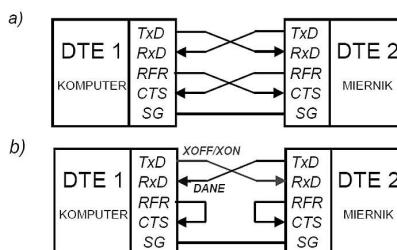
- wyjścia są łączone z wejściami,
- linia z jednego wyjścia może być dołączona jednocześnie do kilku wejść,
- wyjścia nie mogą być zwierane z sobą.



Rys. 6.7. System pomiarowy modemu zerowego do transmisji asynchronicznej znakowej [48]



Rys. 6.8. System pomiarowy modemu zerowego do transmisji asynchronicznej znakowej:
a) transmisja dupleksowa, kabel 3-przewodowy, b) transmisja simpleksowa, kabel 2-przewodowy [48]



Rys. 6.9. System pomiarowy z interfejsem szeregowym IEEE-1174 do dupleksowej transmisji asynchronicznej: a) transmisja sterowana sprzętowo (RFR i CTS), b) transmisja sterowana programowo za pomocą komunikatów XON lub XOFF [48]

Wymianę danych między urządzeniami DTE opisuje norma IEEE-1174 (rys. 6.9), powstała na podstawie standardu RS-232C. Magistrala systemu IEEE-1174 liczy 5 linii, czego dwie to linie danych (TxR i RxR), dwie linie sterujące (RFR i CTS) i jedna linia masy SG. Linia sygnałowa CTS pełni taką samą funkcję jak

w standardzie RS-232C, natomiast linia RFR (ang. Ready For Receive) sygnalizuje gotowość do odbioru danych i zastępuje linię RTS standardu RS-232C.

6.2.2. Interfejsy szeregowe RS-449, RS-530, RS-423A, RS-422A, RS-485

Systemy interfejsu RS-449 i RS-530 (Tab. 6.1) określają parametry funkcjonalne i mechaniczne interfejsu szeregowego. Parametry obwodów elektrycznych do tych dwóch standardów są zawarte w interfejsach RS-423A, RS-422A i RS-485. Ustaleniom zawartym w jednym standardzie RS-232C odpowiadają ustalenia zawarte w parze nowszych standardów, czyli np. RS-449 i RS-423A lub RS-530 i RS-485.

Tab 6.1. Podstawowe parametry najważniejszych interfejsów szeregowych [27]

	RS-232C	RS-423A	RS-422A	RS-485
Maksymalna liczba nadajników	1	1	1	32
Maksymalna liczba odbiorników	1	10	10	32
Max Maksymalna szybkość	20 kb/s	1 00 kb/s	10 Mb/s	1 0 Mb/s
Maksymalna zasięg	15 m	1200 m	1200 m	1200 m

Inne standardy:

- HART umożliwia transmisję z szybkością do 1,2kb/s na odległość do 2000 m;
- IEC 1158-2 (H1) umożliwia transmisję z szybkością do 32 kb/s na odległość do 1900 m oraz IEC 1158-2 (H2) transmisja danych z szybkością 2,5 Mb/s na odległość do 500 m.

6.2.3. System interfejsu MicroLAN

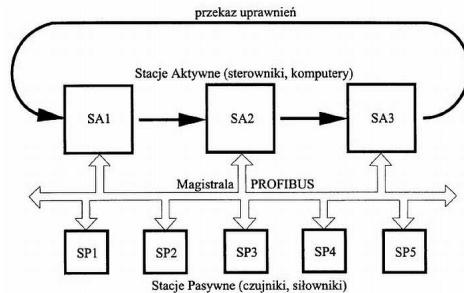
W systemie możliwa jest komunikacja pomiędzy jednym układem typu master (mikrokontroler lub komputer PC) i wieloma elementami typu slave (czujniki i inne układy). System MicroLAN składa się z układu nadrzędnego (bus master) i oprogramowania, połączeń (linia dwuprzewodowa) i zespołu elementów typu slave, takich jak czujniki inteligentne, przetworniki a/c i układy pamięci.

Układem nadrzędnym (master) może być mikrokontroler lub komputer PC wyposażony w port szeregowy RS-232C, poprzez który jest sterowna linia MicroLAN. Standard określa 3 szybkości transmisji 16,3kb/s na magistrali o długości do 300m, 142 kb/s na magistrali krótkiej do 10m i zmienną, dostosowaną do długości magistrali.

6.2.4. Standard PROFIBUS

PROFIBUS (ang. Process Field Bus) to rodzina lokalnych sieci przemysłowych, obejmująca trzy wersje: DP, FMS i PA. Sieć PROFIBUS FMS służy do komunikacji

pomiędzy sterownikami urządzeniami intelligentnymi. Kontrolę dostępu do magistrali mają jedynie stacje aktywne. Stacje pasywne nie mają możliwości inicjowania dostępu do magistrali (rys. 6.10).



Rys. 6.10. Zasada działania sieci PROFIBUS [48]

W standardzie PROFIBUS FMS i DP, jako warstwę fizyczną stosuje się sieć RS-485. Maksymalna długość kabla (od 100 m do 1200 m) zależy od szybkości transmisji (9,6, 19,2, 93,75, 187,5, 500 i 1500 kbit/s, dla PROFIBUS DP dodatkowo 12Mbit/s). Maksymalna liczba stacji wynosi 32.

6.2.5. Interfejs szeregowy CAN

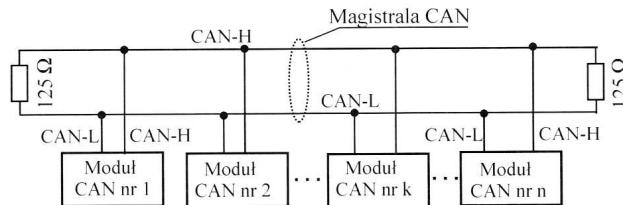
Interfejs CAN (ang. Controller Area Network) został opracowany przez firmy Bosch i Intel na potrzeby przemysłu samochodowego, gdzie wzrastająca systematycznie liczba czujników, urządzeń sterujących i wykonawczych, wymagała zastąpienia licznych przewodów jedną magistralą do transferu danych i rozkazów. Stosowane są różne wersje standardu: CAN 2.0A, CAN 2.0B, jak również CANopen. Elementy podłączone do magistrali CAN nazywa się modułami CAN lub węzłami (rys. 6.11). CAN bywa stosowany również poza przemysłem samochodowym: może stanowić podstawowy interfejs systemu pomiarowego, bywa stosowany w niektórych układach automatyki budynkowej (np.: sterowanie pracą wind).

Podstawowe cechy interfejsu CAN:

- duża szybkość transmisji danych, uzależniona od długości magistrali (1 Mb/s dla długości magistrali do 40 m, 500 kb/s – do 300 m, 100 kb/s – do 600 m, 5 kb/s – do 10 km); w systemach o długości większej niż 1 km stosowane są nadajniki i odbiorniki linii,
- duża odporność na zakłócenia – uzyskana poprzez nadawanie danych w postaci napięciowego sygnału różnicowego oraz sprzętowej obsłudze protokołu i kontroli błędów,
- elastyczność systemu co do liczby podłączanych elementów.

Standard CAN nie specyfikuje ani nośnika informacji ani rodzaju kabla. Sygnały najczęściej przesyłane są symetryczną linią transmisyjną, złożoną z dwóch skręconych

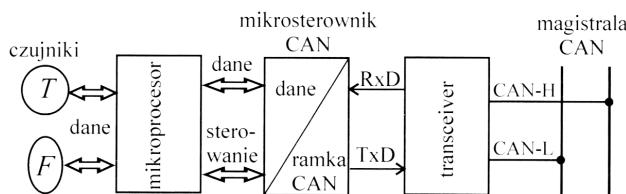
przewodów oznaczanych podłączanych jako CAN-H i CAN-L do modułów magistrali. Symetryczny obwód transmisji zapewnia odporność na zakłócenia pochodzące od urządzeń znajdujących się w pobliżu, na końcach linii instaluje się impedancje w celu unikania odbić sygnału.



Rys. 6.11. Magistrala CAN z modułami CAN [32]

Wszystkie moduły podłączone do magistrali CAN mogą pełnić funkcję nadajnika i odbiornika. Z uwagi na brak adresów, komunikaty na magistrali odbierają wszystkie moduły. Brak adresu skutkuje możliwością łatwego dodawanie i usuwanie modułów.

Wymiana danych odbywa się poprzez wysyłanie i odbierania komunikatów z danymi i rozkazami. Każdy moduł w systemie ma prawo do nadawania komunikatów i jest to możliwe gdy linia nie jest zajęta. W systemie funkcjonują 4 typy ramek (komunikatów) CAN: ramka danych, ramka zdalna (zawiera rozkaz wysłania danych), ramka błędu (wysyłana przez kontroler CAN), ramka przepełnienia (wysyłana gdy odbiornik nie nadąże z odbiorem informacji lub gdy kontroler CAN odbiera bit dominujący). Nadawanie komunikatu przez moduł jest poprzedzone sprawdzeniem zajętości linii transmisyjnej. Gdy jest ona zajęta, moduł opóźnia rozpoczęcie nadawania aż do zwolnienia magistrali. Kolizje występujące na magistrali przy jednoczesnym rozpoczęciu nadawania przez więcej niż jeden moduł eliminuje się przez porównanie wartości logicznej bitów identyfikatora wysyłanego przez każdy moduł.



Rys. 6.12. Schemat blokowy modułu CAN zawierającego czujniki [31]

Moduły CAN muszą zawierać podzespoły odpowiedzialne za komunikacje i przetwarzanie danych (rys. 6.12): układ nadawczo-odbiorczy (transceiver), mikrosterownik CAN, mikroprocesor, czujnik (grupę czujników) lub element wykonawczy (grupę elementów wykonawczych). Osobnym rodzajem modułów są

centrale systemu, która ma takie same prawa odnośnie nadawania, ale może zawierać programy sterujące i/lub gromadzić dane przesypane przez moduły z czujnikami.

Interfejs CAN wymaga użycia czujników wyposażonych w wyjścia cyfrowe, co jest możliwe w przypadku sensorów zintegrowanych i inteligentnych [12]. Do współpracy tego typu sensorów z innymi elementami systemu pomiarowego (np.: mikroprocesorem lub mikrokontrolerem) stosowane są również inne sposoby magistrale transmisyjne: 1-wire, 2-wire, I²C, SMBus, 3-wire, SPI, 5-wire.

6.3. Interfejsy równoległe

Transmisja równoległa cyfrowych sygnałów pomiarowych pozwala uzyskać większe szybkości transmisji niż transmisja szeregową. Wynika to, z jednej strony, ze sposobu transmisji: dane przesypane są w wielobitowych słowach (od 4-bitowych dla standardu Centronics do 64-bitowych dla standardu PCIExpress), a z drugiej strony można unikać podziału strumienia bitów na słowa z implementacją niezbędnych funkcji kontrolnych i ewentualnie korekcyjnych. Systemy pomiarowe z interfejsami szeregowymi nie mogą być zbyt rozległe (rozproszone) z uwagi na niezbędne okablowanie. Wielożyłowy przewód jest zwykle dość kosztowny, ponadto nie można zapomnieć o zakłóceniami trudnych do wyeliminowania w dłuższym wielożyłowym przewodzie: przy szybszych transmisjach pojawiają się zjawiska falowe, nie bez znaczenia są parametry RCL takiego przewodu.

6.3.1. Interfejs równoległy Centronics

Pod tą nazwą funkcjonują tak naprawdę dwa interfejsy przeznaczone do współpracy komputerów z drukarkami: przesyłania danych z komputera do drukarki i rozkazów pomiędzy komputerem a drukarką w obu kierunkach: Centronics i IEEE 1284. Porty interfejsu Centronics oznaczane są symbolem LPTn, gdzie n oznacza numer portu. Najczęściej wykorzystywane jest złącze szufladowe typu DB-25.

Magistrala interfejsu Centronics to 8 linii danych (po 4 dla każdego kierunku), 4 linie sterujące i 5 linii statusu. Sygnały napięciowe odpowiadają standardowi TTL. Dane są wysyłane do drukarki wraz z impulsem strobującym, a szybkość transmisji jest sterowana przez sygnał potwierdzenia, po którym możliwy jest transfer kolejnego bajtu oraz sygnał zajętości, który wstrzymuje transfer danych do drukarki.

Interfejs Centronics wykorzystywany do transferu danych w systemach pomiarowych umożliwia transfer danych z szybkością do 100 KB/s (w obu kierunkach).

Interfejs IEEE-1284 to rozszerzenie interfejsu Centronics (również głównie przeznaczony do współpracy komputera z drukarką), jest stosowany w niektórych

urządzeniach pomiarowych (np.: oscyloskopach, analizatorach widma) i umożliwia wysyłania danych (np.: zrzut ekranu oscyloskopu) do drukarki bez udziału komputera. Interfejs ten umożliwia transmisję danych w obu kierunkach w różnych trybach (kompatybilny, okrojony, bajtowy, rozszerzone: ECP i EPP). Z uwagi na dużą szybkość transmisji trybów rozszerzonych (aż do 2 MB/s) są one predysponowane do budowy prostych, dwuelementowych systemów pomiarowych złożonych z komputera osobistego i urządzenia pomiarowego (np.: multimetru lub oscyloskopu cyfrowego).

6.3.2. Interfejs równoległy IEC-625 (IEEE-488)

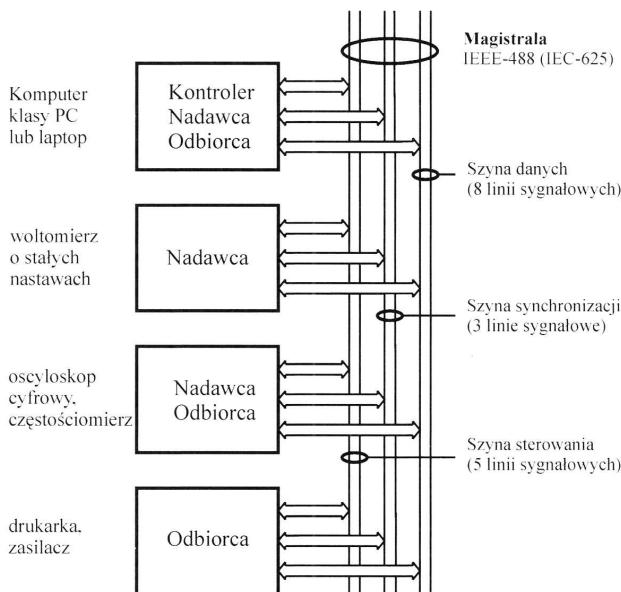
Standard tego interfejsu nazywany jest przez firmę, która go opracowała (Hewlett-Packard) HPIB, firmy National Instruments i Tektronix używają nazwy GPIB. Interfejs był opracowywany z myślą o zastosowaniu w systemach pomiarowych i przeznaczony jest do budowania systemów pomiarowych złożonych z następujących urządzeń:

- a) cyfrowych urządzeń pomiarowych,
- b) sterowanych cyfrowo urządzeń: generatory, zasilacze, źródła prądu i in.,
- c) kontrolera,
- d) rejestratory cyfrowe, drukarki, plotery.

Interfejs IEC-625 ma konfigurację magistralową (rys. 6.13). Urządzenia pełnią funkcję nadawcy lub odbiorcy (również nadawcy i odbiorcy, ale w odrębnych przedziałach czasu). Wymiana informacji polega na wysyłaniu komunikatów (rozkazów, adresów i danych). Kontrolerem systemu jest najczęściej komputer osobisty wyposażony w kartę interfejsu IEC-625 oraz program sterujący (sterownik). W jednym systemie może być więcej kontrolerów, ale tylko jeden być aktywny i zarządzać systemem.

Wymiana informacji zaczyna się od wyboru nadawcy komunikatu (rola kontrolera) i wyznaczenia odbiorcy lub odbiorców. Nadawca przekazuje komunikaty na szynę z wyznaczeni odbiorcy odbierają je potwierdzając odbiór każdego bajtu. W przypadku wielu odbiorców szybkość transferu limituje naj wolniejszy z nich. Podstawowe parametry interfejsu równoległego IEC-625:

- a) równoległa asynchroniczna transmisja magistralą komunikatów w postaci słów o długości jednego bajtu (8 bitów),
- b) sygnały na magistrali w logice ujemnej,
- c) szybkość transmisji do 1 MB/s (1,5-8 MB/s przy zastosowaniu protokołu szybkiej transmisji HS488),
- d) maksymalna liczba urządzeń w systemie 15 (zwiększenie możliwe przez dodawanie kolejnych kontrolerów lub tzw. ekspanderów),
- e) przewód magistrali zawiera 25 linii (24 dla IEEE-488) – zalecana odległość między urządzeniami do 2 m, maksymalna całkowita długość magistrali 20 m.



Rys. 6.13. Struktura systemu pomiarowego z interfejsem IEC-625 (IEEE-488) [31]

6.4. Bezprzewodowe interfejsy pomiarowe

Bezprzewodowe systemy pomiarowe wykorzystywane są wszędzie tam, gdzie nie opłaca się, z uwagi na trudne warunki lub duże odległości zestawiać połączeń kablowych, gdy obiekt badany porusza się (pojazd, wał maszyny lub sportowiec podczas treningu) lub znajduje się w trudno dostępnym miejscu (np.: w przestrzeni kosmicznej). Do najbardziej rozpowszechnionych sposobów transmisji danych i sygnałów sterujących należą systemy wykorzystujące:

- a) radiowe, niewykorzystywane w telekomunikacji, pasma częstotliwości,
- b) sieci transmisyjne telefonii mobilnej,
- c) interfejsy komunikacyjne dedykowane do pracy na małe odległości (fale w zakresie podczerwieni lub radiowe wysokiej częstotliwości o małym zasięgu).

W skład telemetrycznego systemu pomiarowego, a więc przeznaczonego do realizacji pomiarów na odległość, wchodzą nadajniki, odbiorniki, oraz funkcjonalne bloki pomiarowe (jak w każdym systemie pomiarowym). W systemach bezprzewodowych transmisja danych odbywa się wyłącznie szeregowo, nawet jeśli do przesyłu wykorzystuje się więcej niż jeden kanał transmisyjny [3].

W przypadku transmisji danych na niewielkie odległości (do 10 m) system bezprzewodowy zapewnia nam możliwość odłączenia okablowania w warunkach gdy to połączenie jest trudne lub niemożliwe do zrealizowania, np.: z powodu ruchu elementu badanego (wirujący wał) lub brak miejsca na przyłącze kablowe. Dzięki

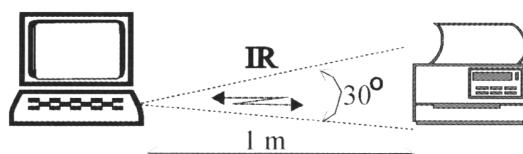
wykorzystaniu małogabarytowych nadajników umieszczonych w pobliżu sensorów można bez większych problemów posługiwać się przetwornikami stosowanymi w przewodowych systemach pomiarowych. Do transmisji danych na małe odległości stosowany jest interfejs szeregowy IrDA wykorzystujący promieniowanie podczerwone oraz interfejs radiowy wykorzystujący częstotliwości dostępne dla urządzeń małej mocy (ICM) bez potrzeby posiadania zezwolenia, które w Polsce wydaje Urząd Komunikacji Elektronicznej. Do tych interfejsów należą: popularny w drobnych urządzeniach użytkowych (telefony mobilne, słuchawki bezprzewodowe, itd.) Bluetooth oraz interfejs ZigBee.

Wymienione wcześniej (a i b) sposoby bezprzewodowej transmisji danych umożliwiają w ogólnym przypadku globalny zasięg i możliwość przesyłania danych. W przypadku wykorzystywania sieci telefonii mobilnej (GSM lub UMTS) transmisja danych jest jedną z dostępnych funkcji towarzyszących transmisji sygnałów akustycznych. Systemy bezprzewodowe bazujące na wydzielonych kanałach radiowych służą wyłącznie do transmitowania danych cyfrowych.

6.4.1. Transmisja bezprzewodowa na małą odległość

a) Interfejs IrDA

Promieniowanie podczerwone jest z powodzeniem wykorzystywane do sterowania już od wielu lat (zdalne sterowanie odbiornikiem telewizyjnym) lub transmisji danych pomiędzy komputerem a drukarką, telefonem mobilnym a komputerem itd. Łącze wykorzystujące promieniowanie podczerwone (długość fali 850-900 nm) służy do bezprzewodowej transmisji danych na odległość do 1 m (max. 3 m) gdy urządzenia „widzą się” nawzajem (rys. 6.14) – kąt emisji nadajnika 15° (max. 30°). Ograniczenia te wynikają z potrzeby ograniczania zakłóceń pochodzących od innych urządzeń. Szybkość transmisji w zakresie od 2,4 do 4000 kb/s (w ramach standardu IrDA 1.3) nie jest zbyt duża i bywa istotnym ograniczeniem dla budowy bardziej złożonych układów pomiarowych, kolejną przeszkodą jest komunikacja ze sobą tylko dwóch urządzeń. Wymagane wzajemne „widzenie się” nadajnika i odbiornika praktycznie wyklucza użycie tego typu interfejsu do transmisji danych z elementów będących w ruchu (np.: wirujący wał, wysięgnik maszyny roboczej). Nadaje się natomiast do zestawiania bezprzewodowych połączeń z pojedynczymi urządzeniami przesyłającymi niewielkie ilości danych.



Rys. 6.14. Transmisja danych cyfrowych z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego [31]

b) Interfejs radiowy Bluetooth

Standard Bluetooth jest łączem radiowym wysokiej częstotliwości (pasmo 2,45 GHz) umożliwiającym transmisję danych z szybkością do 1 Mb/s. Zasięg w zależności od mocy nadajnika wynosi: 1 m, 10 m lub 100 m. W porównaniu z interfejsem IrDA 1.3 możemy zestawiać transmisję danych pomiędzy urządzeniami lub elementami będącymi w ruchu oraz łączyć więcej niż dwa urządzenia (do 8). W ramach takiej małej sieci (nazywanej również pikosiecią) każde z urządzeń może spełniać funkcję nadajnika i odbiornika. W ramach jednej pikosieci tylko jedno z urządzeń, to które inicjuje powstanie pikosieci, pełni funkcję nadzędne w stosunku do pozostałych. Każde z urządzeń wykorzystujących interfejs Bluetooth może spełniać funkcję zarówno nadzędną (master) jak i podrzędną (slave). Należy dodać, że jedno urządzenie może należeć jednocześnie do kilku pikosieci, a kilka pikosieci z elementami wspólnymi tworzą bezprzewodową sieć rozproszoną.

Transmisja danych w systemie Bluetooth odbywa się w ramach wymiany informacji pomiędzy tylko dwoma urządzeniami. W określonym przedziale czasu, właściwie szczelinie czasowej, jedno z urządzeń, nadajnik, przesyła informacje tylko do jednego odbiornika, a odbiornik przyjmuje dane tylko od jednego nadajnika. Transmisję danych nadzoruje urządzenie nadzędne (master), a wymiana informacji następuje tylko w układzie master-slave – urządzenia podrzędne (slave) nie mogą komunikować się ze sobą bezpośrednio.

Interfejs Bluetooth jest bardzo popularny w urządzeniach mobilnych (komputery przenośne, telefony komórkowe) i ich akcesoriach (słuchawki, myszki, itd.). Oferowana szybkość transmisji (do 1 Mb/s) oraz możliwość wymiany informacji w ruchu powodują, że interfejs ten może być wykorzystywany do przesyłania danych w systemach pomiarowych – bez problemu można przyrządy pomiarowe posiadające interfejs szeregowy (RS232C lub USB) wyposażyć w urządzenie nadawczo-odbiorcze (tzw. transceiver) Bluetooth lub też w konwertery interfejsów, np.: Bluetooth-RS-232C [22].

c) Interfejs radiowy ZigBee

Interfejs ten wykorzystuje 3 pasma częstotliwości o różnej prędkości przesyłu danych [11]:

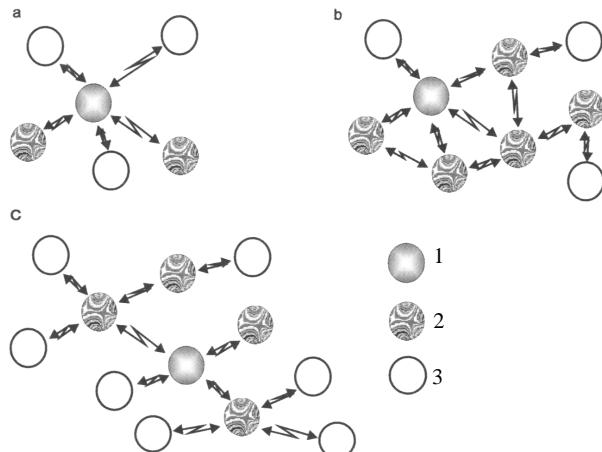
- 1) 868-870 MHz – 20 kb/s,
- 2) 902-928 MHz – 40 kb/s,
- 3) 2,4-2,4835 GHz – do 250 kb/s.

Zasięg ok. 100 m, ale w zależności od warunków i otoczenia może zawierać się w granicach 5-500 m.

Interfejs ZigBee został opracowany z przeznaczeniem do bezprzewodowej transmisji danych z tak małym zużyciem energii (kosztem szybkości transmisji) aby urządzenie mogło pracować co najmniej rok bez wymiany baterii (lub doładowywania akumulatorów). Interfejs jest przewidziany do nieregularnej i rzadkiej wymiany

danych pomiędzy urządzeniami, które przesyłają stosunkowo małe pakiety danych, np.: alarm o przekroczeniu dopuszczalnych wartości mierzonego parametru.

Urządzenia z interfejsem ZigBee mogą pracować w sieciach o różnych topologiach: gwiaździsta, siatkowa lub drzewiasta (rys. 6.15). Dwie ostatnie, z uwagi na większą liczbę połączeń pomiędzy poszczególnymi urządzeniami są bardziej niezawodne. W ramach jednej sieci przynajmniej jedno urządzenie powinno pełnić funkcję koordynatora. Musi to być urządzenie z wszystkimi funkcjami systemowymi, obok takich urządzeń w sieciach o topologii gwiazdowej mogą funkcjonować prostsze (minimalna ilość pamięci RAM i ROM), a więc i tańsze urządzenia, które mają ograniczone funkcje systemowe (nie mogą być koordynatorem sieci i komunikują się tylko z koordynatorem sieci). W ramach jednej sieci koordynator rozpoczyna jej pracę, zarządza węzłami sieci oraz magazynuje dane, urządzenia spełniające funkcję routerów kierują przepływem informacji pomiędzy węzłami. Obecnie gama urządzeń wykorzystujących interfejs ZigBee nie jest bardzo duża, ale dostępność transceiverów ZigBee stale rośnie i mogą one być z powodzeniem wykorzystywane do przesyłania danych w systemach pomiarowych.



Rys. 6.15. Topologie sieci z urządzeniami standardu ZigBee: a) gwiaździsta, b) siatkowa, c) drzewiasta; 1 – koordynator sieci, 2 – urządzenie z wszystkimi funkcjami, 3 – urządzenie z ograniczonymi funkcjami [32]

d) inne systemy radiowe

Należy tutaj wspomnieć o popularnym w komputerach przenośnych interfejsie WLAN (IEEE 802.11, w skrócie nazywany Wi-Fi). Interfejs ten jest stale rozwijany, dzięki czemu znacznie wzrosła szybkość transmisji danych: w wersji systemu IEEE 802.11g wynosi 54 Mb/s. Niedawno przyjęty standard IEEE 802.11n umożliwia transfery z dużo większymi prędkościami przesyłu (100, 250, 540 Mb/s przy paśmie

częstotliwości 2,4 lub 5,0 GHz). Dla osiągnięcia tak wysokich wartości konieczne jest korzystanie z technologii MIMO (Multiple Input Multiple Output), która do nadawania i odbierania sygnałów wykorzystuje wiele anten. Dodatkowo, nadajniki i odbiorniki pracujące w tym standardzie wykorzystują dla wzajemnej komunikacji wiele kanałów jednocześnie. W ramach interfejsu Wi-Fi może być zestawiana komunikacja pomiędzy dwoma urządzeniami lub też za pośrednictwem elementów dodatkowych (routery, punkty dostępowe), które umożliwiają często również dostęp do stacjonarnej sieci komputerowej.

6.4.2. Transmisja z wykorzystaniem sieci transmisyjnych telefonii mobilnej

W systemach transmisyjnych telefonii mobilnej dominuje obecnie w Europie cyfrowy system telefonii mobilnej GSM drugiej generacji, który pracuje w dwóch pasmach częstotliwości 900 i 1800 MHz. Należy podkreślić, że transmisja danych jest jedną z dodatkowych funkcji, obok podstawowej, związanej z transmisją głosu. W ramach systemu trzeciej generacji (UMTS) zakres oferowanych usług jest daleko szerszy i daje potencjalnie lepsze możliwości wykorzystania sieci telefonii mobilnej do bezprzewodowego przesyłania danych. W skład systemu wchodzą telefony mobilne, nazywane stacjami ruchomymi, stacje bazowe i część komutacyjno-sieciowa. Funkcje telefonów mobilnych daleko wykraczają dziś poza swoją pierwotną funkcję dotyczącą transmisji głosu (poczta elektroniczna, dostęp do Internetu, uruchamianie typowych choć uproszczonych aplikacji, tj. edytor tekstów, arkusz kalkulacyjny). Stacje bazowe pośredniczą pomiędzy stacjami mobilnymi i centralą systemu. Wyposażone są w nadajnik, odbiornik oraz antenę, są też połączone (przewodowo lub radiowo) z sąsiednimi stacjami bazowymi. Część komutacyjno-sieciowa odpowiedzialna jest za współpracę z innymi sieciami telefonii, stacjonarnej i mobilnej, zawiera bazę danych stacji ruchomych i bazowych z danymi niezbędnymi do identyfikacji użytkownika sieci.

Transmisja danych wymaga użycia podwójnego kanału transmisyjnego (tryb dupleksowy). Do wymiany danych z analogowymi sieciami telekomunikacyjnymi wykorzystywane są modemy zamieniające cyfrowy sygnał z sieci GSM na analogowy.

W ramach systemu GSM dostępne są następujące usługi transmisji danych:

- 1) SMS – przesyłanie krótkich (do 160 znaków) komunikatów,
- 2) CSD lub też SDT – komutowana transmisja danych cyfrowych z prędkością 9,6 kb/s z wykorzystaniem kanału przeznaczonego na transmisję głosu,
- 3) HSCSD – tzw. szybka wersja CSD, wykorzystująca kilka kanałów przeznaczonych na transmisję głosu,
- 4) GPRS – pakietowa transmisja danych,
- 5) EDGE – ulepszona transmisja danych,
- 6) HSDPA – pobieranie pakietów danych z szybkością 10 Mb/s (max. 21,6 Mb/s).

Transmisja danych z wykorzystaniem SMS pozwala na przesyłanie krótkich komunikatów alfanumerycznych do wybranych stacji ruchomych i z uwagi na niewielkie obciążenie kanału radiowego mogą być one przesyłane również w czasie prowadzenia rozmowy. Z uwagi na wielkość obciążenia sieci, przesyłane komunikaty mogą docierać do odbiorcy z różnym opóźnieniem, a w przypadku wyłączenia czasowego odbiornika, komunikat jest przechowywany i wysyłany do adresata po uzyskaniu połączenia. Z uwagi na niewielką ilość znaków (160) możliwe jest zestawianie komunikatów dłuższych (do 960 znaków), ale są one dzielone na krótsze, przesyłane i rozliczane jako kilka pojedynczych komunikatów. Niewielka ilość transmitowanych danych ogranicza zastosowanie tego sposobu transmisji do prostego monitorowania obiektów lub niezbyt złożonych procesów.

Przesyłanie danych z użyciem CSD, z uwagi na małą szybkość transmisji (9,6 kb/s) znajduje ograniczone zastosowanie do transmisji w systemie pomiarowym. Dodatkowymi wadami jest zajmowanie całego kanału przeznaczonego na rozmowy i rozliczanie przesyłu na podstawie czasu połączenia, a nie ilości przesłanych danych. Nieco lepiej, dzięki kompresji danych oraz zajmowaniu więcej niż jednego kanału przeznaczonego na rozmowy (do 4) przedstawia się transmisja danych w trybie HSCSD – 14,4 kb/s przy kompresji danych i do 57,6 kb/s przy wykorzystaniu 4 kanałów.

Pakietowa transmisja danych w ramach GPRS umożliwia nadawanie i odbieranie danych przesyłanych do odbiorcy w Internecie. Transmisja danych może odbywać się bez przerywania rozmów, pakiety danych traktowane są jako zamknięta całość, opisana adresem przeznaczenia. Szybkość transmisji sięga 115 kb/s. Ten sposób transmisji sprawdza się dobrze przy rozproszonych systemach, gdzie do centrali spływają pakiety danych z poszczególnych stacji pomiarowych. Oprócz większej szybkości, ważną zaletą tego sposobu transmisji danych jest rozliczanie usługi za ilość przesłanych danych a nie czas połączenia. Pakietowa transmisja danych jest również możliwa w trybie EDGE, który dzięki modyfikacjom standardu GSM umożliwia transmisje danych z szybkością do 384 kb/s.

6.4.3. Radiowe systemy transmisji danych

Przy przesyiale danych na odległość powyżej 100 m alternatywą dla sieci telefonii mobilnej są systemy wykorzystujące wydzielone kanały radiowe, niewykorzystywane w telefonii. Do przesyłania danych niezbędne są urządzenia zwane radiomodemami, które funkcjonalnie zbudowane są z nadajnika, odbiornika i układów umożliwiających przetwarzanie sygnałów cyfrowych na sygnały radiowe. Do przesyłania danych niezbędna jest licencja na transmisję radiową nadajnikiem o mocy do 10 W, a do wykorzystywania przeznaczone jest pasmo radiowe o częstotliwościach od 3 kHz do 400 GHz. W systemie pomiarowym, każda ze stacji wyposażona jest, obok aparatury pomiarowej, w radiomodem z anteną, najlepiej kierunkową, która zmniejsza wpływ

zakłóceń i pozwala obniżyć moc nadajników. W przeciwnieństwie do sieci GSM system pomiarowy wyposażony w radiomodemy jest strukturą zamkniętą dla postronnych użytkowników. Parametry transmisji: rodzaj transmisji, częstotliwość nośna, protokół transmisji nie są powszechnie dostępne, a transmisja odbywa się bez zwłoki, która często towarzyszy transferowi z wykorzystaniem GSM. Szybkości transmisji z wykorzystaniem radiomodemów mieszczą się pomiędzy 1200 b/s do 19600 b/s.

Należy na koniec zwrócić uwagę na wymaganą ochronę danych w systemach bezprzewodowych. Szczególnie istotne jest to w sytuacji, gdy wykorzystujemy popularne standardy i interfejsy używane powszechnie. Otwartość i standaryzacja protokołów komunikacyjnych i dostępność sygnałów w „eterze” dają potencjalną możliwość nieautoryzowanego dostępu do transmitowanych informacji, a stosowane sposoby szyfrowania nie zawsze są wystarczające.

7. Zagadnienia wybrane

7.1. Bezkontaktowe pomiary temperatury

Zdalny, bezdotykowy pomiar temperatury jest wykorzystywany w szeroko pojętej diagnostyce urządzeń elektrycznych, mechanicznych oraz kontroli izolacji lub wentylacji. Stosuje się je do kontroli temperatury pracujących urządzeń (w ruchu, pod napięciem itp.), kontroli stanu procesów (hutnictwo metali i ceramiki), urządzeń i instalacji przemysłowych, lokalizacji miejsc o podwyższonej temperaturze, wykrywanie zagrożeń pożarowych.

Podstawą fizyczną działania czujników bezkontaktowych jest fakt, że wszystkie ciała o temperaturze wyższej od zera absolutnego (0 K) emittują promieniowanie cieplne. Pomiar natężenia tego promieniowania jest wykorzystywany w pirometrach do określenia temperatury ciała. W pomiarach bezkontaktowych wykorzystuje się najczęściej promieniowanie w zakresie podczerwieni. Natężenie i widoczny rozkład promieniowania cieplnego jest funkcją, nie tylko temperatury ciała, ale też składu chemicznego, kształtu oraz powierzchni, co jest źródłem pewnych błędów. Tylko dla ciała doskonale czarnego natężenie promieniowania jest wyłącznie funkcją temperatury.

Emisyjność ciał rzeczywistych zależy od ich budowy wewnętrznej. Z ciał stałych, dielektryki mają najczęściej dużą emisyjność, a metale mają niewielką zdolność emisyjną (elektrony swobodne tworzą tzw. chmurę elektronową). Promieniowanie cieplne w obrębie ciał stałych i cieczy jest bardzo mało przenikliwe, natomiast w gazach zjawisko to ma charakter objętościowy. Emitowany strumień ciepła zależy od temperatury ciała:

$$q = \varepsilon \cdot k \cdot A \cdot T^4 \quad (7.1)$$

gdzie:

ε - współczynnik emisyjności powierzchni,

k – stała Boltzmanna,

A – pole powierzchni promieniującej,

T – Temperatura powierzchni emitującej.

Powysza zależność jest nieliniowa ze względu na temperaturę a emitowany strumień ciepła jest funkcją współczynnika emisyjności, którego wartość jest funkcją rodzaju materiału i rodzaju powierzchni. Największe wartości mają powierzchnie chropowate i matowe, natomiast powierzchnie wypolerowane mają emisyjność znacznie mniejszą. Wartości współczynników emisyjności wybranych materiałów przedstawiono w tabeli 7.1.

Strumień ciepła jest funkcją powierzchni. Pomiar bezkontaktowy uniemożliwia absorbowanie całego strumienia emitowanego przez ciało. Czujnik absorbuje jedynie

pewną część promieniowania. Ilość absorbowanej energii zależy od stosunku powierzchni czujnika i powierzchni ciała emittującego promieniowanie oraz od wzajemnego położenia tych powierzchni. Wartość absorbowanego strumienia ciepła zależy również od odległości oraz kąta wzajemnego ustawienia tych powierzchni. Nie bez znaczenia jest również gaz znajdujący się pomiędzy dwoma powierzchniami – promieniowanie odbierane przez czujnik jest pomniejszane o wartość zaabsorbowaną przez materię znajdującą się pomiędzy czujnikiem a obiektem mierzonym. Błąd ten (wymagający odpowiedniej poprawki) może być nawet dosyć duży, gdy pomiędzy powierzchnią emitującą a czujnikiem będą obecne silnie stężone takie gazy jak para wodna, dwutlenek węgla lub duża ilość pyłów.

Do pomiarów bezstykowych wykorzystywane są bardzo często pirometry (rys. 7.1), termografy oraz kamery termowizyjne.



Rys. 7.1. Zastosowania pirometrów [19]

Rozróżnia się trzy zasadnicze typy pirometrów, oparte na zasadzie pomiaru natężenia promieniowania globalnego (radiacyjne), monochromatycznego i dwubarwowego.

Działanie pirometru promieniowania globalnego opiera się na pomiarze promieniowania w zakresie od podczerwieni do nadfioletu. Pirometr ten stosuje się do pomiaru temperatury wewnętrz pieców przemysłowych lub temperatury powierzchni ciał w zakresie 400-2500°C.

W zależności od rodzaju elementu skupiającego promieniowanie na detektorze wyróżniamy pirometry radiacyjne :

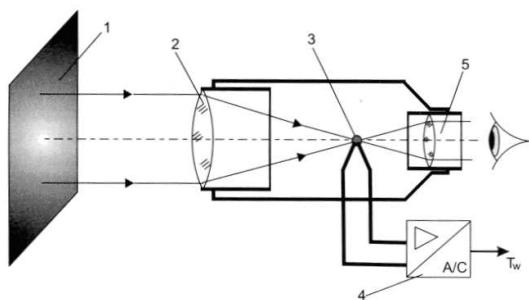
- soczewkowe,
- zwierciadłowe,
- ze światłowodem.

Na rysunku 7.2 przedstawiono schemat pirometru soczewkowego. Soczewka skupia na termostosie promieniowanie obserwowanego obiektu. Materiał soczewek powinien cechować się małym współczynnikiem pochłaniania promieniowania. Najczęściej stosuje się soczewki szklane (zakres mierzonych temperatur: 700-2000°C) lub kwarcowe (zakres 400-1200°C). Aby zminimalizować odbijanie promieniowania od soczewki powierzchnie zewnętrzne soczewek pokrywa się warstwą siarczku cynku (ZnS) lub dwutlenku krzemu (SiO₂). Siła elektromotoryczna termostosu jest

wzmacniana i przetwarzana tak, aby uzyskać wyjściowy sygnał analogowy lub cyfrowy.

Tab. 7.1. Współczynniki emisyjności wybranych materiałów [36]

Materiał	Temperatura [°C]	ε
Aluminium: polerowane powierzchnia szorstka	225 ... 575 26	0,039 ... 0,057 0,055
Brąz: polerowany powierzchnia szorstka	50 50 ... 150	0,1 0,55
Chrom	100 ... 1000	0,08 ... 0,26
Chromonikiel	125 ... 1034	0,64 ... 0,76
Cyna, blacha stalowa cynowana błyszcząca	25	0,043 ... 0,064
Cynk blacha stalowa ocynkowana utleniona	24	0,276
Miedź: polerowana handlowa obrabiona do połysku	50 ... 100 22	0,02 0,072
Mosiądz utleniony	200 ... 600	0,59 ... 0,61
Nikiel: polerowany	100	0,045
Ołów utleniony, szary	20	0,28
Platyna polerowana	200 ... 600	0,05 ... 0,1
Rtęć	0 ... 100	0,09 ... 0,12
Staliwo polerowane	770 ... 1040	0,52 ... 0,56
Stal: blacha walcowana świeżo obrabiona	50 20	0,056 0,24
Wolfram	230 ... 3300	0,053 ... 0,39
Złoto polerowane	200 ... 600	0,02 ... 0,03
Żeliwo: utlenione obrabione	200 ... 600 800 ... 1000	0,64 ... 0,78 0,6 ... 0,7
Drewno heblowane	20	0,8 ... 0,9
Emalia biała na powierzchni żelaznej	20	0,9
Farby olejne kolorowe	100	0,92 ... 0,96
Gips	20	0,8 ... 0,9
Glina wypalona	70	0,91
Guma	20	0,86 ... 0,95
Lód gładki	0	0,97
Marmur polerowany	20	0,93
Tynk wapienny	10 ... 90	0,91
Papa dachowa	21	0,91
Papier	20	0,7 ... 0,94
Sadza	40 ... 370	0,95
Smoła	-	0,79 ... 0,89
Szkło	20 ... 1500	0,94 ... 0,67
Śnieg	-	0,8
Węgiel kamienny	100 ... 600	0,81 ... 0,79
Woda	50	0,95
Žużel kotłowy	0 ... 1800	0,97 ... 0,67



Rys. 7.2. Budowa pirometru radiacyjnego soczewkowego, 1-objekt mierzony, 2-soczewka, 3-termostos, 4-przetwornik, 5-objektyw [36]

Piometry radiacyjne monochromatyczne (rys. 7.3) działają na zasadzie porównania jaskrawości obiektu i włókna żarówki wzorcowej. Porównanie promieniowania odbywa się tylko dla jednej długości fali, zwykle z zakresu 0,6-0,72 mm. Żarówka jest zasilana prądem stałym, którego natężenie jest regulowane i mierzone amperomierzem. Filtr czerwony o efektywnej długości fali $\lambda=650$ nm, pozwala obserwować zarówno obiekt badany jak i włókno żarzące włókno żarówki. Pomiar polega na porównaniu okiem (przez filtr czerwony) luminacji włókna żarówki z luminacją obiektu badanego. Temperaturę włókna żarówki można zmieniać regulując natężenie prądu przepływającego przez żarówkę. Operator dąży do osiągnięcia stanu równowagi, w którym temperatura włókna żarówki i obiektu badanego są takie same – objawia się to zanikaniem obrazu włókna. Odczyt polega na odczycie wartości natężenia prądu płynącego przez żarówkę, które jest proporcjonalne do temperatury. Z uwagi na to, że piometry tego typu wzorcowane dla temperatury ciała doskonale czarnego, dla rzeczywistych obiektów temperatury będą zaniżone, co koryguje się zgodnie ze wzorem:

$$T_{rz} = \frac{1}{\frac{1}{T_w} + \frac{\lambda_e}{a} \ln(\varepsilon)} \quad (7.2)$$

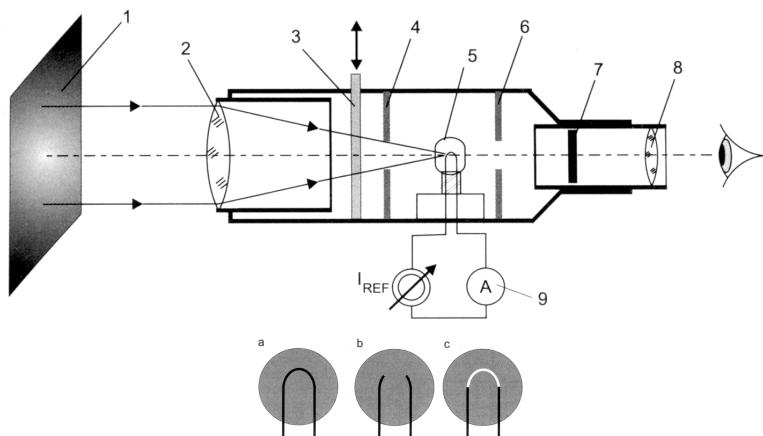
gdzie:

T_{rz} – temperatura rzeczywista,

T_w – temperatura wskazana przez pirometr,

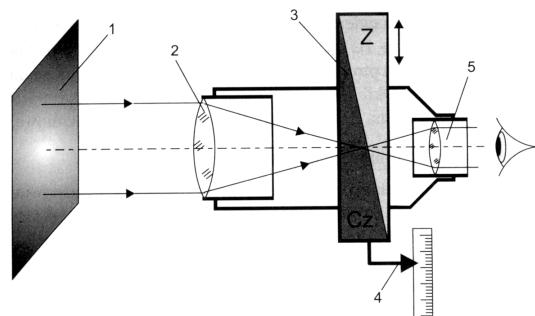
a – stała Plancka,

ε – współczynnik emisyjności.



Rys. 7.3. Budowa i zasada działania pirometru monochromatycznego ze znikającym włóknem, 1-obiekt obserwowany, 2-soczewka, 3-filtr szary, 4,6-przesłony, 5- żarówka, 7-filtr czerwony, 8-okular, 9-amperomierz; obraz w okularze: a-temperatura obiektu wyższa niż włókna żarówki, b- równe temperatury obiektu i włókna, c- temperatura obiektu niższa niż włókna żarówki [36]

W pirometrach dwubarwowych (rys. 7.4) wykorzystana jest zależność stosunku natężenia promieniowania o dwu długościach fali od temperatury ciała mierzonego. Z promieniowania globalnego wydziela się dwie wiązki o różnych długościach fali (najczęściej czerwoną i niebieską) i podaje się je naprzemiennie na wspólny detektor z określona częstotliwością.



Rys. 7.4. Budowa pirometru dwubarwowego, 1-obiekt obserwowany, 2-soczewka, 3-filtr dwubarwowy, 4-wskazówka, 5- okular [36]

Różny stosunek grubości płytki czerwonej i zielonej powoduje różny stosunek pochłaniania barwy zielonej i czerwonej. Punkt odczytu to takie ustawienie filtru, gdy obie barwy są jednakowo pochłonięte a obserwator widzi w obiektywie kolor szary. W przypadku ręcznej obsługi (zakres pomiarowy: $600\text{--}2200^{\circ}\text{C}$) błąd pomiaru sięga $\pm 10^{\circ}\text{C}$ (duże znaczenie ma doświadczenie operatora), w przypadku pracy

automatycznej (zakres pomiarowy: $800\text{--}2200^{\circ}\text{C}$) błąd jest dużo mniejszy i wynosi $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$

Na rysunku 7.5 pokazano pirometry przenośne, natomiast na rysunku 7.6, pirometry stacjonarne. Wśród tych ostatnich spotyka się zarówno wersje kompaktowe jak i wersje z oddzieloną głowicą pomiarową, co jest przydatne w niektórych aplikacjach przemysłowych. Pirometry są wyposażone w różnej wielkości wskaźniki oraz w zależności od wersji, możliwość regulacji współczynnika emisyjności, skali temperatur. Zakres regulacji współczynnika emisyjności $0.1\text{--}1.2$, zakres mierzonych temperatur, w zależności od wykonania, nawet do 3000°C .



Rys. 7.5. Pirometry przenośne [19]



Rys. 7.6. Pirometry stacjonarne [19]

Termografy i kamery termowizyjne rozszerzają możliwości pirometrów umożliwiając obrazowanie rozkładu temperatury obiektu. Zakres obserwowanych temperatur jest dosyć szeroki ($-40\text{--}2000^{\circ}\text{C}$ – obszar ten jest zwykle dzielony na podzakresy i często wymagane są dodatkowe filtry), uzyskiwane rozdzielczości (dokładność) pomiaru temperatury zależy od klasy urządzenia (najgorsze mają rozdzielcość ok. 2°C).

Kamery termowizyjne są wyposażone w detektor w postaci matrycy o określonej rozdzielczości, który umożliwia jednoczesną obserwację całego lub fragmentu obiektu. W zależności od wykonania, możliwa jest rejestracja z różnymi szybkościami (nawet do setek obrazów na sekundę), co pozwala obserwować obiekty ruchome lub śledzić szybkozmienne procesy. Zwykle kamery wyposażane są w pamięć masową umożliwiającą zapis pewnej liczby termogramów (wraz z opisem) oraz oprogramowanie dodatkowe, które umożliwia późniejszą analizę zarejestrowanych

termogramów. Opcje wbudowane w kamery to przede wszystkim: możliwość zdefiniowania odległości, współczynnika emisyjności, sposobu obrazowania (paleta kolorów) itd. Na rysunku 7.7 pokazano kamerę przenośną termowizyjną wyposażoną w wyświetlacz LCD, nie chłodzony detektor o rozdzielczości 640x480 i zakresie mierzonych temperatur -40÷2000°C.



Rys. 7.7. Przenośna kamera termowizyjna SC620 firmy Flir [16]

7.2. Urządzenia do pomiaru przepływu w kanałach zamkniętych

Natężenie przepływu oraz ilość przepływającego materiału należą do wielkości często mierzonych w przemyśle przetwórczym. Przepływomierze mierzą średni przepływ masy (kg/s) lub objętości (m^3/s) przepływającego materiału, albo też jego średnią lub chwilową prędkość (m/s). Ze względu na dużą różnorodność wymagań w stosunku do przetworników pomiarowych tych wielkości, spowodowaną konieczną dokładnością pomiarów, własnościami fizycznymi i chemicznymi mierzonych płynów, a także technicznymi warunkami pomiarów, istnieje wiele metod i technicznych realizacji pomiaru omawianych parametrów.

Ze względu na zasadę działania przepływomierze możemy podzielić na:

- przepływomierze wykorzystujące pomiar różnicy ciśnień lokalnych w przepływającym płynie,
- przepływomierze wirnikowe i oporowe,
- przepływomierze kalorymetryczne,
- przepływomierze ultradźwiękowe,
- przepływomierze elektromagnetyczne,

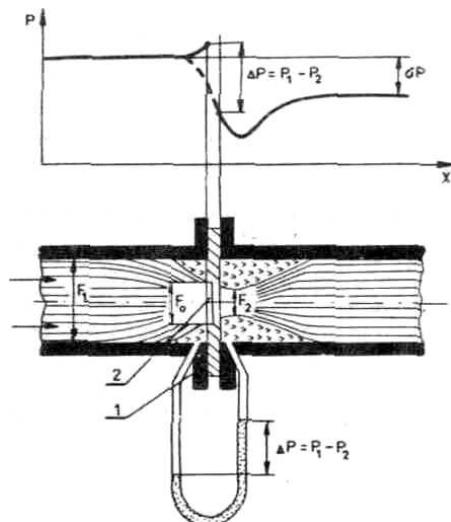
7.2.1. Przepływomierze wykorzystujące pomiar różnicy ciśnień lokalnych w przepływającym płynie

Przepływomierze, w których dla określenia wielkości przepływu wykorzystywana jest zależność lokalnych ciśnień w rurociągu od lokalnej prędkości przepływu płynu w rurociągu stanowią różnorodną i często spotykaną grupę. Można je jeszcze podzielić na:

- przepływomierze z wyjściem w postaci różnicy ciśnień (rurka Pitota, przepływomierz zwężkowe)
- przepływomierze z wyjściem w postaci sygnału powstającego z przetworzenia różnicy ciśnień, np. na położenie płynaka (rotametr) czy naprężenie (przepływomierz oporowy).

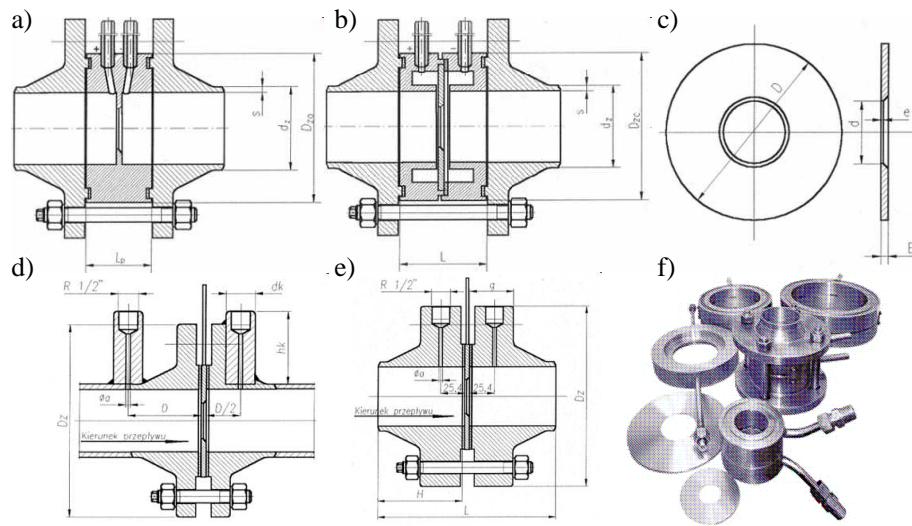
a) Przepływomierze zwężkowe

Mimo rozwoju techniki pomiarowej i technologii, przepływomierze zwężkowe (metoda dławikowa) są nadal bardzo rozpowszechnionym środkiem pomiaru przepływu. Lokalne przewężenie rurociągu powoduje lokalny wzrost prędkości przepływu i spadek ciśnienia. Choć rozkład ciśnienia wzdłuż rurociągu jest skomplikowany, to jest on powtarzalny i dobrze scharakteryzowany. Istnieją różne sposoby pomiaru różnicy ciśnień (w różnych miejscach rurociągu), co wiąże się z różnymi zależnościami między wielkością przepływu a towarzyszącym mu spadkiem ciśnienia. Jeśli rozmieszczenie punktów pomiarowych jest takie jak na rysunku 7.8, to różnica ciśnień ΔP jest proporcjonalna do ilości płynu przepływającego przez rurociąg. Zaletą tej metody pomiarowej jest niski koszt i prosta budowa urządzeń pomiarowych.



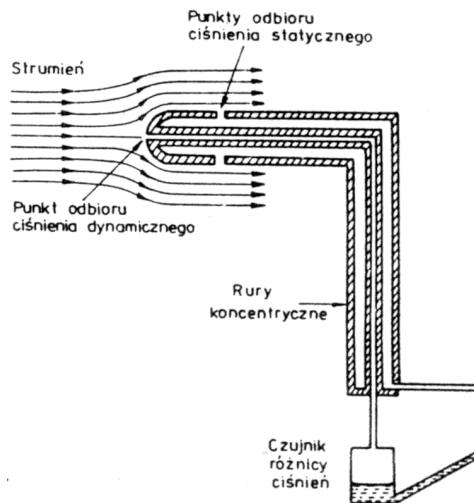
Rys. 7.8. Kryza pomiarowa i rozkład ciśnienia w płynie: 1 – tarcza, 2 - otwór [51]

Stosuje się trzy zasadnicze typy zwężek: kryzy miernicze, dysze miernicze i zwężki Venturiego. Na rysunku 7.9 przedstawiono znormalizowane elementy do dławienia przepływu.



Rys. 7.9. Znormalizowane elementy do dławienia przepływu: a) zwężki z przytarczowym szczelinowym odbiorem ciśnienia, b) kryza do zwężek z przytarczowym odbiorem ciśnienia, c) zwężka z odbiorem ciśnienia typu d - d/2, d) zwężka z odbiorem ciśnienia typu kołnierzowego,e) elementów do montażu na znormalizowanych rurociągach [19]

b) Rurki Pitota



Rys. 7.10. Zasada pomiaru prędkości przepływu rurką Pitota [51]

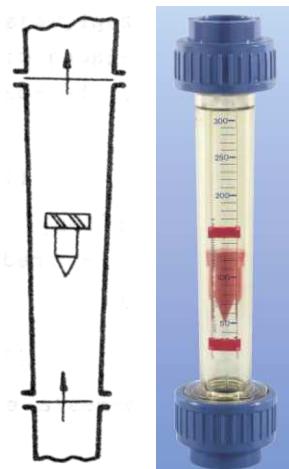
Z pomocą rurki Pitota (rys. 7.10) można mierzyć lokalną prędkość płynu. Rurka ma dwa typy otworów otwartych dla mierzonego płynu. Jeden typ, którego osi jest równoległa do kierunku przepływu płynu i ciśnienie w nim panujące jest równe ciśnieniu całkowitemu i drugi typ otworów, których osie są skierowane prostopadle do

kierunku przepływającego płynu i w których ciśnienie jest równe ciśnieniu statycznemu przepływającego płynu.

Rurki Pitota są powszechnie używane do pomiaru prędkości przepływu w tunelach aerodynamicznych, choć mogą być używane do pomiaru przepływu dowolnego płynu. Są one dokładne, odporne mechanicznie i mało wymagające, jeśli chodzi o konserwację. Zasadniczą wadą rurek Pitota jest ich mała czułość w zakresie małych prędkości przepływu i nieliniowa zależność prędkości od różnicy ciśnień.

c) Rotametry

Do pomiaru natężenia przepływu zarówno cieczy, jak i gazów często używa się przyrządu zwanego rotometrem (rys. 7.11). Jest on szczególnie często stosowany do pomiaru niezbyt dużych natężień przepływu płynów silnie korodujących.



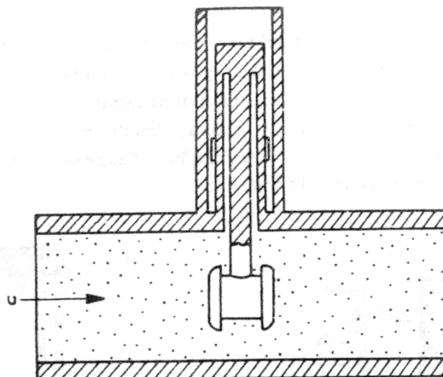
Rys. 7.11. Schemat [51] i widok [19] rotametu

Najważniejszą częścią przyrządu jest pionowa, często szklana rurka, rozszerzająca się ku górze. Wewnętrzny profil rury jest paraboloidą obrotową, dzięki czemu można stosować liniową skalę odczytu przepływu, która jest naniesiona najczęściej bezpośrednio na zewnętrzną ściankę rury. Wewnętrz rury znajduje się płynak, który - zależnie od szybkości przepływu przez rurę - wznosi się na odpowiednią wysokość. Najczęściej spotykany typ płynaka ma w górnej części nacięcia w postaci odcinków linii śrubowej, przez co uzyskuje w czasie pracy ruch obrotowy. Zapobiega to możliwości przylepienia się płynaka do ścianki rurki. Podczas przepływu płynu przez przyrząd przeciska się on przez szczelinę między odcinkami rurki a płynakiem. Szybkość płynu w szczelinie jest naturalnie dużo większa, co powoduje - analogicznie jak w przypadku zwęźka - spadek ciśnienia za szczeliną, czyli zaraz nad płynakiem. Wytwarza się więc różnica ciśnień pod i nad płynakiem, która równoważy ciężar płynaka, utrzymując go na pewnej wysokości. Gdy natężenie przepływu wzrasta,

zwiększa się szybkość przepływu płynu w szczelinie oraz różnica ciśnień. W tej sytuacji parcie na pływak od dołu jest większe niż ciężar pływaka w danej cieczy i pływak uniesie się do góry. Ponieważ średnica rury wzrasta ku górze, w miarę wznoszenia pływaka powiększa się szczelina, szybkość płynu w niej maleje oraz maleje różnica ciśnień pod i nad pływakiem aż do momentu zrównoważenia jej przez ciężar pływaka. Zostaje osiągnięty stan równowagi. Pływak zatrzymuje się na określonej wysokości rotametru i na podziałce można odczytać, jakiemu przepływowi to odpowiada.

d) Przepływomierz oporowy

W przepływomierzu oporowym (rys. 7.12) płyn opływa ciało w nim zanurzone. Ciśnienie dynamiczne, niczym nie zrównoważone po drugiej stronie opływanego ciała, powoduje działanie siły. Siła jest często mierzona za pomocą tensometrów, naklejonych na ramionach mocujących element oporowy. Przepływomierze oporowe mogą przenosić stosunkowo wysokie częstotliwości zmian sygnału, choć jest to uzależnione od odpowiedniego tłumienia drgań. Zastosowanie symetrycznego elementu oporowego daje możliwość pomiaru przepływu w obu kierunkach z dobrymi własnościami urządzenia przy przekraczaniu zera.



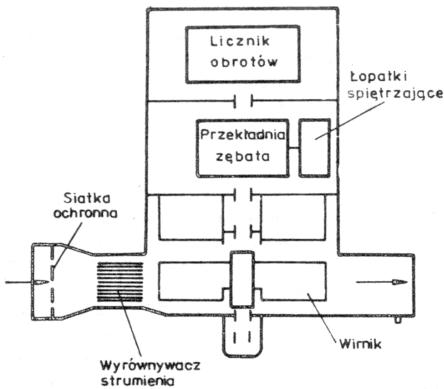
Rys. 7.12. Schemat budowy przepływomierza oporowego [51]

Przepływomierze oporowe są odporne mechanicznie i często są używane do pomiarów przepływu płynów o dużych zanieczyszczeniach mechanicznych, które wiele innych przepływomierzy czynią bezużytecznymi. Przepływomierze oporowe mogą być używane zarówno do pomiaru przepływu cieczy, jak i gazów.

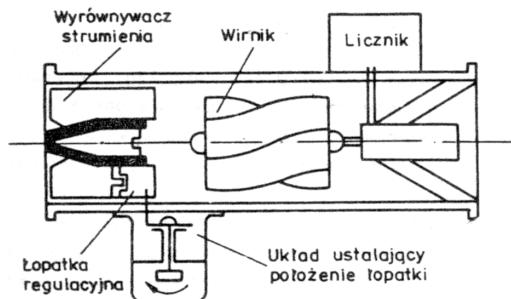
7.2.2. Przepływomierze wirnikowe

Główną częścią przepływomierza tego typu jest wirnik, obracający się podczas przepływu cieczy przez przyrząd. Szybkość obrotu wirnika jest proporcjonalna do średniej szybkości strumienia przepływającej cieczy. Ze względu na konstrukcję

wirnika przepływomierze tego typu dzieli się na skrzydełkowe (rys. 7.13) i śrubowe (rys. 7.14).



Rys. 7.13. Przepływowomierz skrzydełkowy [51]



Rys. 7.14. Przepływowomierz śrubowy [51]

7.2.3. Przepływowomierze kalorymetryczne

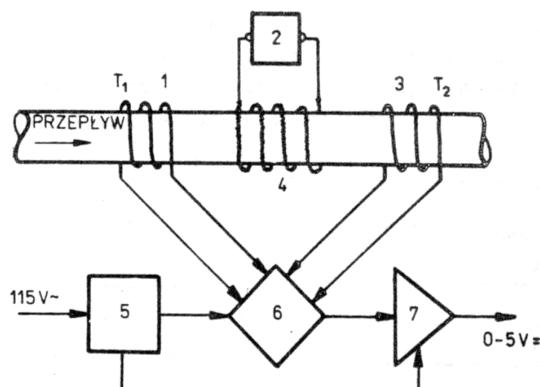
Przepływowomierze kalorymetryczne (przepływowomierze z cieplnymi parametrami rozłożonymi) dzięki prostej budowie, niezawodności konstrukcji oraz taniej eksploatacji, są powszechnie stosowane i służą do kontroli przepływu cieczy i gazów. Urządzenia te nie posiadają żadnych elementów mechanicznych dzięki czemu mają praktycznie nieograniczony okres eksploatacji. Zasada ich działania opiera się na stwierdzeniu, że jeśli przepływającemu płynowi o ciepłe właściwym c zostanie dostarczona, w postaci ciepła, moc P , to z przyrostu temperatury ΔT można bezpośrednio wyznaczyć masowe natężenie przepływu M .

Omówioną zasadę można realizować dwoma technikami pomiarowymi:

- do grzejnika dostarcza się stałą moc P i mierzy różnicę temperatur strumienia przed i za grzejnikiem, $M = f(\Delta T)$,

- zakłada się stałość różnicy temperatur T (stabilizowana jest regulatorem automatycznym), a moc jest odpowiednio dopasowywana do wielkości przepływu, $M = f(P)$.

Schemat przepływomierza kalometrycznego przedstawiono na rysunku 7.15. Pracuje one na zasadzie mostka oporowego zbudowanego z precyzyjnych rezystorów. Dwa rezystory jednej gałęzi mostka umieszczone są poza wpływem badanego medium. Na jeden z rezystorów, drugiej gałęzi mostka ma wpływ tylko temperatura medium, w którym czujnik się znajduje. Na ostatni z rezystorów oprócz temperatury ma wpływ przepływające medium powodując odbieranie ciepła tego rezystora, wprowadzając zaburzenie równowagi mostka. Przy braku przepływu temperatury tych rezystorów są takie same i mostek znajduje się w stanie równowagi.



Rys. 7.15. Schemat przepływomierza kalorymetrycznego: 1 - czujnik temperatury na wejściu, 2 - źródło zasilania grzałki, 3 - czujnik temperatury na wyjściu, 4 - grzałka, 5 - zasilacz, 6 - układ mostkowy, 7 - wzmacniacz standaryzujący [51]

Najważniejszymi zaletami przepływomierzy kalorymetrycznych są:

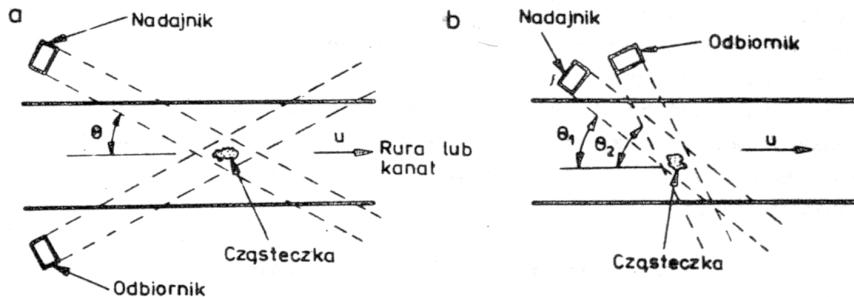
- brak części ruchomych, stabilna praca w szerokim zakresie temperatur,
- brak ingerencji mechanicznej w przepływ płynu,
- dodatkowa funkcja kontroli temperatury (opcja).

7.2.4. Przepływomierze ultradźwiękowe

Przepływomierze wykorzystujące zmianę częstotliwości (przesunięcie Dopplera) podczas rozpraszania fali ultradźwiękowej przez ruchome medium pracują jako przepływomierze z falą ciągłą (rys. 7.16) lub przepływomierze impulsowe.

Zakres zastosowań tych przepływomierzy jest ograniczony do płynów w których znajduje się wystarczająca liczba wtrąceń rozpraszających falę akustyczną.

Przepływowomierze tego typu stosuje się chętnie w medycynie i biologii ze względu na możliwość pomiaru prędkości krwi bez konieczności wnikania w strukturę organizmów żywych.

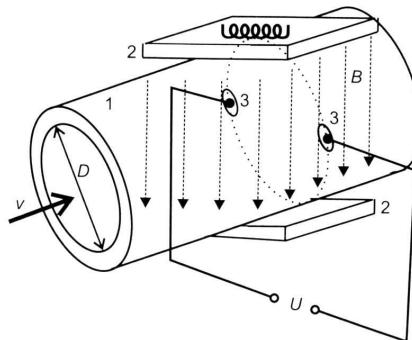


Rys. 7.16. Sposoby rozmieszczenia przetworników w przepływowomierzu Dopplera z falą ciągłą:
a) nadajnik i odbiornik po przeciwnych stronach rurociągu, b) nadajnik i odbiornik po tej samej stronie rurociągu [51]

7.2.5. Przepływowomierze elektromagnetyczne

Przepływowomierze elektromagnetyczne mogą być wykorzystane wyłącznie do pomiaru przepływu cieczy o właściwościach przewodnika elektrycznego. W działaniu przepływowomierza elektromagnetycznego wykorzystuje się zjawisko indukcji elektromagnetycznej w przewodniku elektrycznym umieszczonym w polu magnetycznym. Pole magnetyczne jest wytwarzane przez cewki wchodzące w skład czujnika, a przewodnikiem elektrycznym jest przepływająca ciecz. Czujnik przepływowomierza ma kształt rury o długości 250-350 mm wykonanej z izolatora elektrycznego, na przykład PTFE.

Schemat i zasadę działania przepływowomierza elektromagnetycznego przedstawiono na rysunku 7.17. Prostopadle do osi rury są umieszczone cewki 2 z prądem wytwarzające pole magnetyczne o indukcji B . Na ściankach wewnętrznych rury, prostopadłe do jej osi, lecz w płaszczyźnie poziomej, są umieszczone elektrody 3. Elektrody czujnika wykonuje się z materiału nieaktywnego chemicznie, ale przewodnika elektrycznego, często z platyny. Ciecz płynąca rurą zawiera nośniki ładunku elektrycznego: elektrony i jony. Nośniki ładunku są odchylane w polu magnetycznym i wytwarzają napięcie elektryczne U na elektrodach 3. Wartość napięcia U jest proporcjonalna do prędkości przepływu cieczy v oraz do indukcji magnetycznej B . Czujnik jest wmontowywany w rurociąg jako jego odcinek (rys. 7.18).



Rys. 7.17. Schemat przepływomierza elektromagnetycznego: 1 – rurociąg, 2 – cewki, 3 – elektrody [19]



Rys. 7.18. Przepływomierz elektromagnetyczny do montażu na znormalizowanym rurociągu [19]

7.3. Wzmacniacze pomiarowe

Wzmacnianie sygnału i jego formowanie to podstawowe funkcje realizowane w analogowych układach pomiarowych.

Formowanie sygnału polega na zmianie jego zależności względem czasu, częstotliwości lub innego sygnału.

Obok podstawowej funkcji, jaką jest wzmacnianie, wzmacniacze pełnią następujące funkcje w systemie pomiarowym:

- dopasowanie impedancji,
- przetwarzanie sygnału napięciowego w prądowy i o
- specjalne funkcje przetwarzania jak sumowanie, całkowanie, różniczkowanie sygnałów,
- separacja źródła od obciążenia.

Podstawowe parametry wzmacniacza to:

1. Wzmocnienie
 - a) wzmocnienie różnicowe, k_{up}
 - b) wzmocnienie sygnału wspólnieznego, k_{uc} ,

2. Współczynnik tłumienia sygnału współbieżnego (ang. Common Mode Rejection Ratio, CMRR):

$$CMMR = 20 \log \left(\frac{k_{up}}{k_{uc}} \right) \quad (7.3)$$

3. Szerokość pasma.
 4. Impedancia wejściowa i wyjściowa.
 5. Wejściowy prąd i napięcie niezrównoważenia.
 6. Współczynnik temperaturowy wejściowego napięcia niezrównownoważenia.
 7. Współczynnik zmian wejściowego napięcia niezrównoważenia od zmian napięcia zasilania.
 8. Maksymalna prędkość zmian napięcia wyjściowego
 9. Maksymalne napięcie wejściowe różnicowe.
 10. Maksymalne wspólne napięcie wejściowe.
 11. Napięcie zasilania, pobór mocy, zakres temperatury pracy.

Najważniejsze niedoskonałości wzmacniaczy prądu stałego to:

- niestałość wzmacnienia,
- szумy własne,
- dryft napięciowy i prądowy,
- zależność wzmacnienia od częstotliwości.

Wzmacniacz pomiarowy powinien charakteryzować się następującymi cechami:

- duża impedancia wejściowa,
- niska impedancia wyjściowa,
- wysoki współczynnik tłumienia sygnału współbieżnego (CMRR).

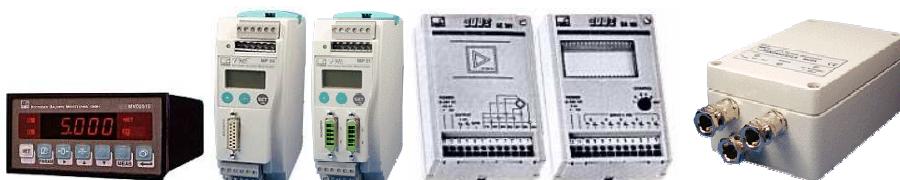
Klasyfikacja wzmacniaczy pomiarowych:

- a) ze względu na rodzaj wzmacnianego sygnału:
 - napięciowe,
 - prądowe,
 - ładunkowe.
- b) ze względu na rodzaj sygnału wyjściowego:
 - napięciowe,
 - prądowe.
- c) ze względu na pasmo przenoszonych częstotliwości:
 - wzmacniacze prądu stałego,
 - szerokopasmowe,
 - selektywne.
- d) Ze względu na strukturę układu wejściowego:
 - niesymetryczna,
 - symetryczna-różnicowa.

- e) Ze względu na fazę napięcia wyjściowego względem napięcia wejściowego:
 - odwracające,
 - nieodwracające.
- f) Ze względu na sposób regulacji wzmacnienia:
 - skokowy,
 - płynny.
- g) Ze względu na sposób ustawiania wzmacnienia:
 - manualny,
 - automatyczny (programowany).

Wzmacniacze pomiarowe przemysłowe (rys. 7.19) to urządzenia w wykonaniach umożliwiających pracę w trudnych warunkach (obudowy zapewniające np.: pyłoszczelność - MC2A/MC3 f-my Hottinger), zwykle wyposażone w 1 (lub kilka) zakres pomiarowy, proste w obsłudze, bez wyświetlacza lub z niewielkim kilkuwierszowym, jedno- lub dwukanałowe, często przeznaczone do montażu na szynie (DIN) wraz z innymi urządzeniami lub na panelach. Spotykane w wersjach analogowych, z wyjściami analogowymi i cyfrowymi, również wersje w pełni cyfrowe pracujące w układach automatyki z wykorzystaniem interfejsów ProfiBus, Ethernet, CAN.

Wzmacniacze pomiarowe laboratoryjne (rys. 7.20) to urządzenia o uniwersalnym charakterze, umożliwiające współpracę z czujnikami takimi jak mostki tensometryczne, indukcyjne, częstotliwości, temperatury, czujnikami dostarczającymi sygnał napięciowy lub prądowy. Komunikację z komputerem zapewniają standartowe łącza takie jak RS232, Centronics, IEE488 bądź Ethernet. MGCplus jest przykładem wzmacniacza o szerokiej gamie dostępnych modułów, wyposażony w wyświetlacz umożliwiający graficzną lub cyfrową wizualizację wielkości mierzonych. Może być wyposażony w dysk umożliwiający gromadzenie danych. Spider8 – mniej uniwersalny, z ograniczoną możliwością rozbudowy (ale z wielofunkcyjnymi modułami podstawowymi), wzmacniacz doskonale nadający się do realizacji pomiarów w trudnych warunkach (obudowa) – wymaga komputera do realizacji pomiarów.



Rys. 7.19. Wzmacniacze pomiarowe przemysłowe [18, 19]

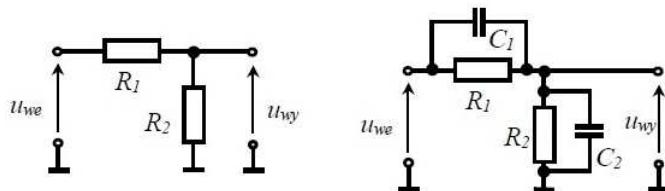


Rys. 7.20. Wzmacniacze pomiarowe laboratoryjne firmy Hottinger Baldwin Messtechnik: MGCPlus, Spider8 [18]

7.4. Tłumiki sygnałów elektrycznych

Elementy te stosuje się rzadko, w przypadku występowania sygnałów przekraczających dopuszczalny zakres zmian na wejściu odbiornika. Na rysunku 7.21 przedstawiono schemat najprostszego tłumika zrealizowanego jako dzielnik napięciowy oraz skompensowany dzielnik napięciowy spełniający warunek $R_1C_1=R_2C_2$. Współczynnik tłumienia sygnału jest stosunkiem napięć wejściowego napięcia wyjściowego, co można wyrazić również ilorazem:

$$a = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (7.4)$$



Rys. 7.21. Dzielnik napięciowy i dzielnik napięciowy skompensowany

W przypadku tłumika sygnału rezystorowego typu T (rys. 7.22) powinny być dobrane następujące rezystancje:

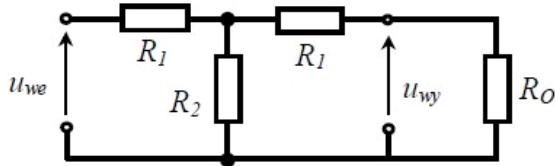
$$R_1 = R_o \frac{a-1}{a+1} \quad (7.5)$$

$$R_2 = R_o \frac{2a}{a^2 - 1} \quad (7.6)$$

gdzie:

a – współczynnik tłumienia,

R_o – rezystancja obciążenia.



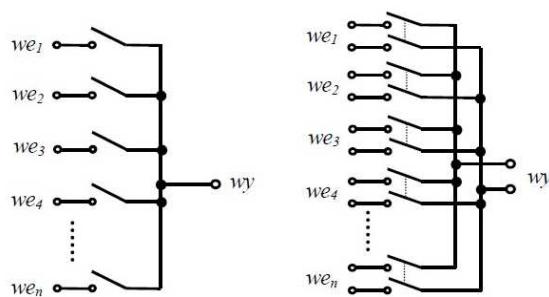
Rys. 7.22. Tłumik rezystorowy typu T

7.5. Multipleksery analogowe

Multipleksery analogowe to układy umożliwiające naprzemienne podłączenie wielu analogowych wielkości mierzonych do jednego układu pomiarowego (np.: przetwornika A/C). Podstawowym zespołem funkcjonalnym multipleksera jest element przełączający, który może być zrealizowany jako przekaźnik kontaktronowy oraz jako klucz półprzewodnikowy. Najważniejsze cechy tych zespołów to:

- przekaźniki kontaktronowe - mała szybkość przełączeń do kilkuset herców, mała rezystancja w stanie zamknięcia ($50 \div 200 \text{ m}\Omega$) i bardzo duża w stanie otwarcia (ponad $10 \text{ G}\Omega$),
- klucze półprzewodnikowe – duża szybkość przełączeń do kilkuset MHz, duża rezystancja w stanie zamknięcia ($50 \div 2000 \Omega$) i duża w stanie otwarcia.

Spotykane są różne konfiguracje multiplekserów, na rysunku 7.23 przedstawiono multiplekser jedno- i dwuprzewodowy. Z uwagi na złożoność układu nie buduje się multiplekserów analogowych o ilości wejść przekraczającej dwieście.



Rys. 7.23. Konfiguracje multiplekserów: jednoprzewodowa i dwuprzewodowa

7.6. Filtry

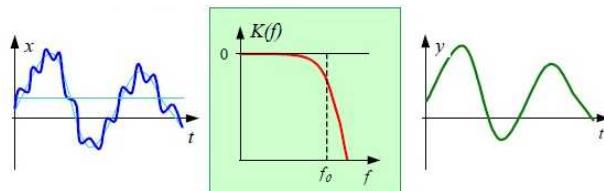
Filtry są czwórnikami o specjalnie ukształtowanych charakterystykach częstotliwościowych. Ich właściwości przedstawia się zwykle za pomocą

częstotliwościowych charakterystyk amplitudowej i fazowej. Sygnał po przejściu przez filtr zmienia swoje widmo. Zmiana ta polega na różnym tłumieniu amplitud różnym przesuwaniu faz składowych widma o poszczególnych częstotliwościach.

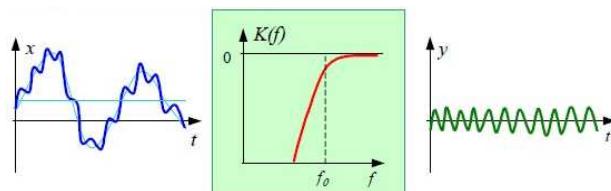
Filtracją nazywamy proces przetwarzania sygnału w dziedzinie czasu. Polega on na redukowaniu niepożądanych składowych zawartych w sygnale wejściowym, filtrem natomiast może być każde urządzenie posiadające selektywne charakterystyki częstotliwościowe. Poza fizycznymi realizacjami filtrów, używa się również filtrów cyfrowych, które są realizowane jako algorytm lub proces obliczeniowy, w wyniku którego jedna sekwencja liczb (tzn. sygnał wejściowy) zamieniany jest w inną sekwencję (tzn. sygnał wyjściowy)

W układach pomiarowych najczęściej stosuje się filtry o częstotliwościowych charakterystykach amplitudowych:

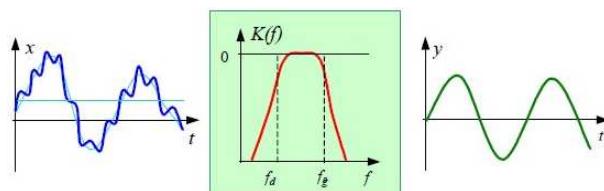
- dolnoprzepustowe (rys 7.24),
- górnoprzepustowe (rys 7.25),
- średkowoprzepustowe (rys 7.26),
- średkowozaporowe (rys 7.27).



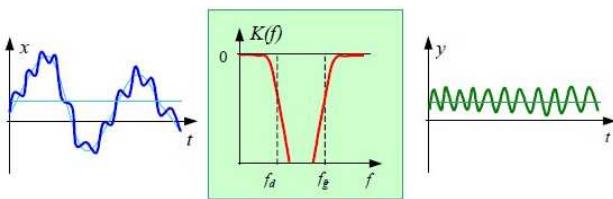
Rys. 7.24. Filtr dolnoprzepustowy



Rys. 7.25. Filtr górnoprzepustowy

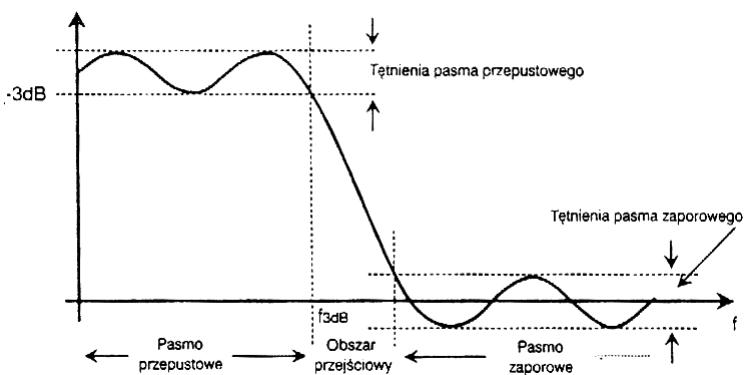


Rys. 7.26. Filtr średkowoprzepustowy



Rys. 7.27. Filtr środkowozaporowy

Podstawowymi kryteriami służącymi do oceny filtrów są: odpowiedź amplitudowa (rys. 7.28), odpowiedź fazowa (rys. 7.29) oraz odpowiedź na skok jednostkowy (rys. 7.30).

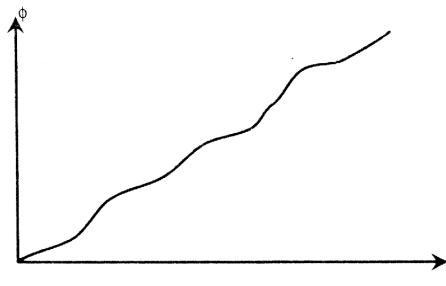


Rys. 7.28. Charakterystyka amplitudowa

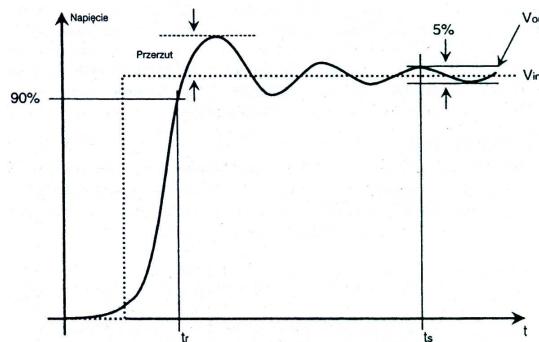
Pasmo przepustowe charakterystyki amplitudowej to obszar częstotliwości, w którym sygnał przechodzi przez układ praktycznie nie osłabiony. Pasmo to rozciąga się do punktu w którym amplituda spada poniżej 3 dB wartości nominalnej. Punkt ten nazywany jest częstotliwością odcięcia f_{3dB} . Obszar przejściowy nazywany stromością nabylenia charakterystyki określa szybkość zmiany wzmacnienia wraz z częstotliwością, zawiera się między pasmem przepustowym a zaporowym. Natomiast pasmo zaporowe, to pasmo częstotliwości, których amplituda ma zostać zmniejszona poniżej zaprojektowanego poziomu. Parametry oceny filtru to: tętnienie pasma przepustowego i zaporowego oraz stromość nabylenia charakterystyki. W zależności od przeznaczenia filtru dopuszcza się zarówno pewien poziom tętnienia jak i określoną szerokość obszaru przejścia, możliwe jest zaprojektowanie filtra z bardzo stromą charakterystyką lub taki, który nie wprowadza zakłóceń w paśmie przepustowym.

Charakterystyka fazowa to zależność fazy do częstotliwości. Odpowiedź fazowa jest ściśle związana z czasem opóźnienia przechodzącego przez filtr sygnału dla różnych częstotliwości. Filtry o liniowej odpowiedzi fazowej opóźniają wszystkie

częstotliwości o taki sam czas. Filtry o nieliniowej odpowiedzi fazowej opóźniają różne częstotliwości o różne okresy, co wprowadza zakłócenia podobne do zjawiska „rozproszenia” sygnału radiowego wynikające z nieustannie zmieniającą się drogą emitowanych fal. Charakterystyka fazowa widoczna na rysunku 7.29 nie jest idealnie liniowa ponieważ widoczne są lekkie oscylacje fazy.



Rys. 7.29. Charakterystyka fazowa



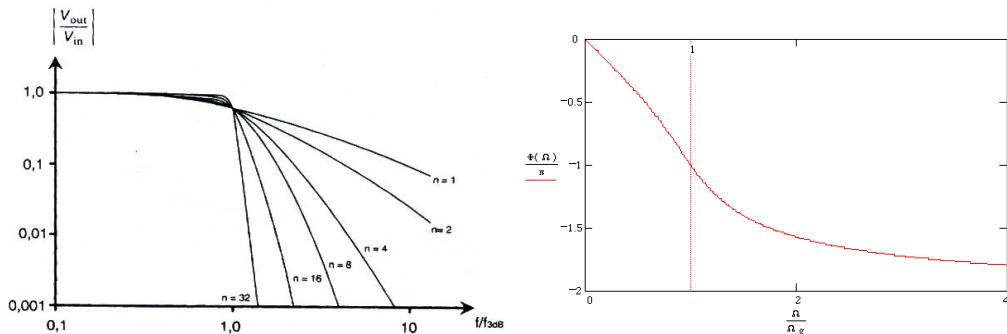
Rys. 7.30. Odpowiedź na skok jednostkowy

Odpowiedź na skok jednostkowy cechują: czas narastania odpowiedzi (jest to czas w którym napięcie wyjściowe osiągnie poziom 90% do swojej wartości maksymalnej t_r), czas ustalania (czas w jakim napięcie wyjściowe ustala się w obrębie 5% odchylenia od swojej wartości końcowej t_s), przerzut (maksymalna wartość napięcia o jakie napięcie wyjściowe przewyższa chwilowo swoją wartość końcową), tężnienie (oscylacje wokół średniej wartości końcowej). Najczęściej stosowane filtry dolnoprzepustowe to:

a) Filtry Butterwortha (rys. 7.31)

W stosunku do innych filtrów mają najbardziej płaski przebieg charakterystyki amplitudowej w paśmie przepustowym. Odbywa się to kosztem załamania charakterystyki pod koniec pasma przepustowego. Mają one również nieliniową charakterystykę fazową. W filtrze Butterwortha najważniejszym celem jest uzyskanie

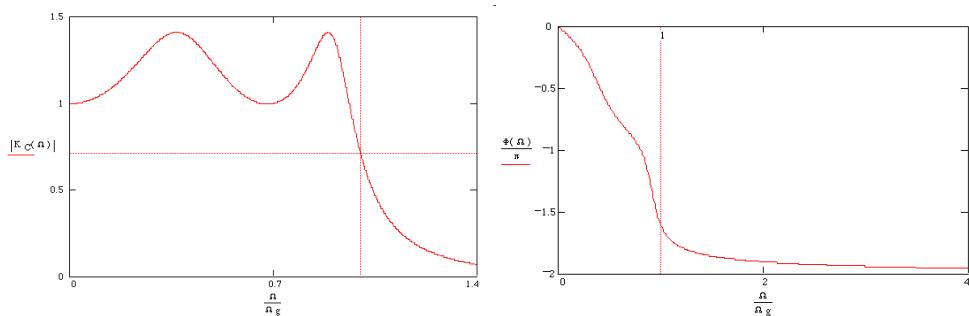
maksymalnej płaskości charakterystyki amplitudowej. Charakterystyka powinna zaczynać się maksymalnie płasko dla zerowej częstotliwości i przeginać się dopiero w pobliżu częstotliwości granicznej f_g (f_g jest zwykle częstotliwością 3 dB). Filtry tego rodzaju stosuje się do filtracji sygnałów niemodulowanych, w celu wyeliminowania zakłóceń o częstotliwościach leżących poza pasmem użytecznym.



Rys. 7.31. Charakterystyka amplitudowa i fazowa filtru Butterwortha

b) Filtry Czebyszewa (rys. 7.32)

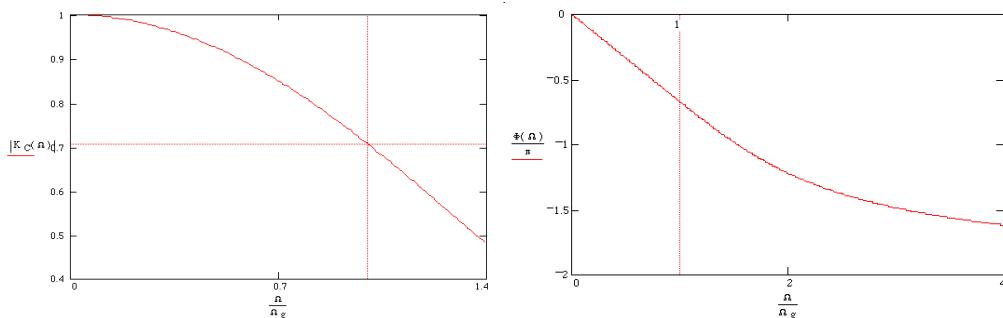
Filtry te charakteryzują się dużą selektywnością, tężnieniami pasma przepustowego oraz zaporowego, nieliniowością charakterystyki fazowej i większą w porównaniu z filtrem Butterwortha stromością charakterystyki. Filtry Czebyszewa stanowią ulepszenie filtrów Butterwortha w stosunku do nachylenia charakterystyki, tym niemniej obydwa te filtry mają niezadowalającą odpowiedź fazową a filtry Czebyszewa nawet gorszą. Filtry Czebyszewa są też czasem nazywane filtrami o równomiernym falowaniu, gdyż tężnienia w obrębie całego pasma przepustowego są jednakowe. Ponadto gęstość ich wzrasta wraz ze wzrostem rzędu filtru. Stosuje się je przy filtracji sygnałów niemodulowanych i zmodulowanych amplitudowo w celu wyeliminowania silnych sygnałów zakłócających o częstotliwościach mało różniących się od częstotliwości sygnału użytecznego.



Rys. 7.32. Charakterystyka amplitudowa i fazowa filtru Czebyszewa

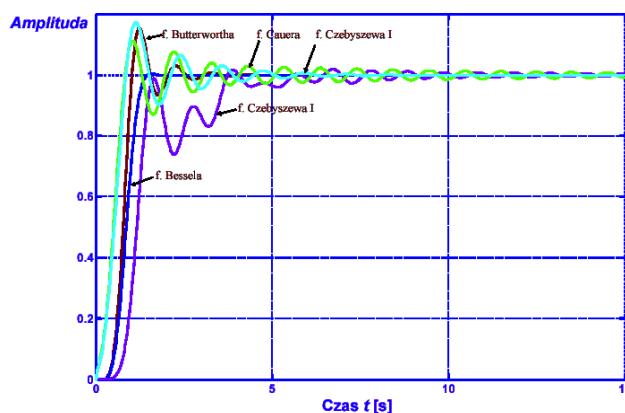
c) Filtry Bessela (rys. 7.33)

Filtry te charakteryzują się prawie liniowym przebiegiem charakterystyki fazowej, a więc wprowadzają do układu stałe opóźnienie czasowe w określonym paśmie częstotliwości. Filtry Bessela odznaczają się bardzo małymi przewyższeniami w sygnale odpowiedzi na skok napięcia wejściowego i szybkim narastaniem tego sygnału. Stosuje się je przede wszystkim jako filtry dolnoprzepustowe przy filtracji sygnałów zmodulowanych fazowo, ponieważ praktycznie przekształcają one sygnał bez zniekształceń fazowych.



Rys. 7.33. Charakterystyka amplitudowa i fazowa filtru Bessela

Odpowiedzi na skok jednostkowy powyższych filtrów przedstawiono na rysunku 7.34.



Rys. 7.34. Odpowiedzi na skok jednostkowy popularnych filtrów

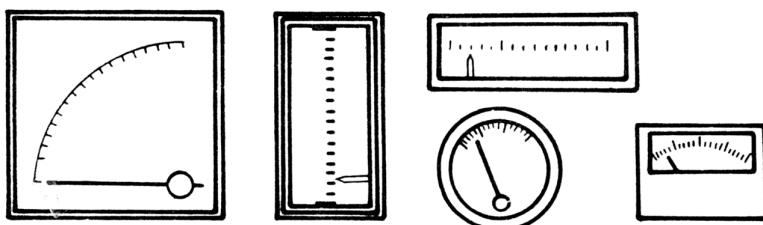
7.7. Urządzenia wskazujące

Mierniki wskazujące, montowane w zautomatyzowanych obiektach, przeznaczone są do odwzorowywania wartości chwilowych kontrolowanych parametrów procesu:

- mierniki montowane bezpośrednio na obiekcie w miejscu, gdzie występuje wielkość mierzona – służą głównie dozorowi technicznemu obiektu i wykorzystywane są do bieżącej kontroli parametrów. Używane w stanach awaryjnych, podczas rozruchu lub remontów – umożliwiają ręczne sterowanie procesem. Najczęściej są to mierniki analogowe, np. wodowskazy szklane. Mierniki tego typu są zwykle wyskalowane bezpośrednio w wielkościach fizycznych;
- mierniki montowane w pobliżu pulpitu operatora lub też wmontowane w pulpit – służą do kontroli parametrów procesu przez operatora. Najczęściej znajdują się daleko od punktu w którym znajduje się czujnik. Sygnał przekazywany jest jako elektryczny sygnał standardowy lub cyfrowy. Są wyskalowane bezpośrednio w wartościach mierzonych lub też w procentach zakresu pomiarowego – mierniki uchybu, położenia elementu wykonawczego.

Mierniki wskazujące analogowe to przyrządy tablicowe o znormalizowanych wymiarach zwykle klasy 1,5 (czasem do 0,25) w różnych formach (rys. 7.35):

- mierniki z ruchomą skalą – skala sprzężona z potencjometrem, służącym do zadawania wartości zadanej – w okienku ukazuje się jedynie spodziewany fragment skali wokół spodziewanego zakresu zmian wielkości mierzonej
- mierniki z dwoma systemami pomiarowymi – dwie wskazówki i dwa systemy pomiarowe wykorzystują jedną skalę – oszczędność miejsca
- mierniki z układami sygnalizacyjnymi – wyposażone w ograniczniki lub czujniki położenia wskazówki – umożliwia to sygnalizację przekroczenia przez sygnał mierzony nastawionych wartości progowych.



Rys. 7.35. Mierniki wskazujące analogowe [51]

Wskaźniki cyfrowe (rys. 7.36) umieszczane zwykle w obudowach standardowych umożliwiają obserwację (i regulację) typowych wielkości mierzonych. Wyposażone najczęściej w uniwersalne wejścia i wyjścia (sygnały standardowe prądowe i napięciowe) oraz interfejsy komunikacyjne (RS 232C, RS-485 itd.). W zależności od potrzeb dobiera się wielkość i typ wyświetlacza umożliwiający odczyt z dużych odległości oraz w warunkach zmniejszonej przejrzystości powietrza.



Rys. 7.36. Mierniki wskazujące cyfrowe [19]

Wskaźniki graficzne (rys. 7.37) służą zwykle do cyfrowej lub graficznej (konfigurowalne) prezentacji (wskazywania) wielkości mierzonej. Najczęściej wyposażone w wyświetlacze LCD monochromatyczne lub kolorowe. Oferowane są Również występują z szeroką gamą wejść i wyjść.



Rys. 7.37. Wskaźnik graficzny [19]



Rys. 7.38. Przykładowy pulpit sterowniczy, 1-elewacja górska, 2-elewacja przednia, 3-segment górný, 4-segment przedni, 5-segment dolny, 6-osłony tylne, 8-cokół

Opisane powyżej elementy są często montowane na pulpitach sterowniczych (rys. 7.38) przeznaczonych do bezpośredniej obsługi obiektów lub też są instalowane na tablicach synoptycznych (rys. 7.39), które służą do obrazowania stanu obiektu lub

procesu. Tablice takie są stosowane nawet wówczas, gdy do bezpośredniej obsługi i wizualizacji stanu obiektu (procesu) są wykorzystywane programy komputerowe (rys. 7.40)



Rys. 7.39. Przykładowa mozaikowa tablica synoptyczna



Rys. 7.40. Nastawnia blokowa Elektrowni Opole

7.8. Rejestratory

Rejestratory przemysłowe (rys. 7.41) – zadaniem rejestratora jest zapis informacji na odpowiednim nośniku w celu uzyskania trwałej dokumentacji pomiarowej parametrów istotnych dla procesu technologicznego. Najczęściej rejestrowane są

przebiegi zmian wartości mierzonej w czasie. Niektóre rejestratory umożliwiają też rejestrację związków funkcyjnych wielkości mierzonych np.: $x=f(y)$.

Podstawowe elementy składowe: urządzenie piszące, napęd urządzenia piszącego, nośnik zapisu i napęd nośnika zapisu.

Typowe nośniki zapisu, determinujące rodzaj urządzenia piszącego, to:

- zwykły papier (ołówek, rysik, atramentowa rurka strumieniowa)
- papier termoczuły
- papier fotoczuły (strumień światła).

Rejestratory dzielimy na jedno i wielokanałowe, spotyka się następujące rozwiązania konstrukcyjne:

- kilka niezależnych rejestratorów w jednej obudowie,
- kilka niezależnych urządzeń piszących i ich napędów pracujących na jednym wspólnym nośniku,
- jedno urządzenie piszące.



Rys. 7.41. Przykłady rejestratorów piszących [19]



Rys. 7.42. Rejestrator cyfrowy z wyświetlaczem [19]

Rejestratory cyfrowe (rys. 7.42) danych należą do nowej generacji urządzeń rejestrujących, odbiegających filozofią rozwiązań od tradycyjnych rejestratorów z zapisem na taśmie papierowej. Całkowicie elektroniczne, o niewielkich wymiarach i masie, bez elementów mechanicznych, z własnym źródłem zasilania gromadzą dane w wewnętrznej, półprzewodnikowej pamięci. Do ich programowania oraz odczytu zarejestrowanych danych służą programy zainstalowane w komputerze klasy PC. Programy te zapewniają konfigurację rejestratorów w zakresie czasów próbkowania,

opóźnienia startu rejestracji, sposobu zapisu pamięci, ustawienia progów alarmowych i ewentualnie komunikacji modemowej. Połączenie z komputerem odbywa się przez standardowe interfejsy komunikacyjne.

7.9. Błędy pomiarowe

Błędy występujące w pomiarach wielkości fizycznych można podzielić na:

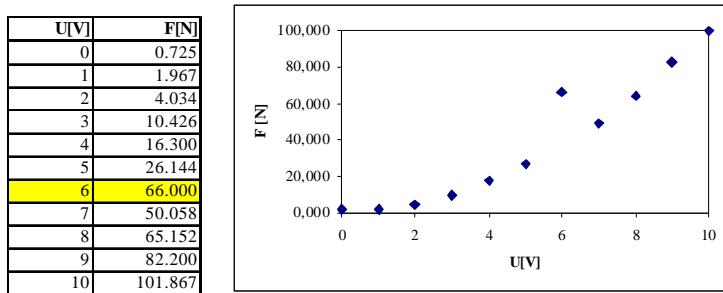
1. Błędy nadmierne – wynikają zwykle z nieprawidłowo wykonanego pomiaru (np.: fałszywy odczyt wskazania, użycie uszkodzonego bądź niewłaściwego przyrządu, błąd rachunkowy).
2. Błędy systematyczne – przy wielu pomiarach tej samej wielkości, wykonanych przy tych samych warunkach, pozostają stałe zarówno co do wartości bezwzględnej, jak i co do znaku lub też zmieniają się według określonego prawa wraz ze zmianą warunków. Wynikają z uproszczonego charakteru używanych zależności analitycznych, niedokładności użytych przyrządów, wzorców, stałego wpływu czynników zewnętrznych i innych. Błędy systematyczne mogą być wprowadzone przez osobę realizującą pomiar w sposób świadomym (np. błąd paralaksy).
3. Błędy przypadkowe – zmieniają się w sposób nieprzewidziany zarówno co do wartości bezwzględnej, jak i co do znaku przy wykonywaniu dużej liczby pomiarów tej samej wielkości, w warunkach praktycznie niezmiennych. Podstawową przyczyną błędów przypadkowych jest statystyczny charakter wielkości mierzonych (np.: grubość blachy, z której wykonano membranę faktycznie jest różna w różnych miejscach, rezystancja tensometrów tej samej partii nie jest identyczna, średnice tłoków silników spalinowych itd.). Źródłem błędów przypadkowych mogą być również przyrządy pomiarowe, a także sam eksperymentator, przy realizacji pomiarów, które wymagają jego subiektywnej oceny (np. ocena natężenia dźwięku).

Rzetelne oszacowanie poprawności pomiaru wymaga wyeliminowania lub też wyznaczenia wartości poszczególnych błędów.

Eliminacja błędów nadmiernych zwykle jest dosyć prosta. Najczęściej wystarczy rzut oka na wykres lub zestawione w postaci tabeli wyniki pomiarów (rys. 7.43), aby zidentyfikować wyniki znacznie odbiegające od innych wyników.

W niektórych przypadkach taka intuicyjna ocena może być niewystarczająca i prowadząca do fałszywych wniosków, albo też chcemy w sposób bardziej miarodajny eliminować wyniki pomiarów obarczone tego rodzaju błędami. W takich sytuacjach, przy analizie wyników pomiarów posługujemy się hipotezami statystycznymi służącymi do eliminacji wyników odstających (kryterium 3σ , testy wartości średnich, metoda Chauveneta, Dixon, Grubbsa i in.). Polegają one zwykle na przyjęciu pewnego poziomu prawdopodobieństwa wystąpienia określonego

rozrzutu punktów pomiarowych i rozstrzygnięciu, czy analizowany wynik spełnia warunek zaliczenia go do poprawnych.



Rys. 7.43. Ilustracja eliminacji błędów nadmiernych

Błędy systematyczne możemy podzielić na stałe i zmienne, które dzielimy na: postępowe (tzn. stałe rosnące lub stałe malejące w funkcji określonego parametru) oraz okresowe (zmieniające się okresowo w funkcji parametru wpływowego). Błędy systematyczne możemy eliminować wprowadzając poprawki, które czasem są dołączane do metryczek precyzyjnych przyrządów pomiarowych lub umieszczane w katalogach. Gdy brak takich danych, możemy sami określić poprawkę dla błędu systematycznego stałego metodą wzorcowania punktowego (przyrząd wzorcowy powinien być odpowiednio wyższej klasy). Różnica wskazań obu przyrządów przy wielokrotnym pomiarze w tym samym punkcie pomiarowym jest taką poprawką dla błędu systematycznego. Typowy błąd systematyczny stały to np.: błąd zrównoważenia zera czujników tensometrycznych w temperaturze otoczenia.

Charakter błędów przypadkowych powoduje, że nie można jednoznacznie ich określić drogą elementarnych operacji rachunkowych. Błędy przypadkowe możemy jedynie oszacować korzystając z elementów rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. Szacowanie błędów przypadkowych polega na określeniu przedziału, który z określonym poziomem prawdopodobieństwa zawiera poszukiwaną rzeczywistą wartość wielkości mierzonej. Szacowanie błędów przypadkowych należy przeprowadzać po eliminacji błędów nadmiernych i systematycznych. Wynika to, między innymi, z przyjmowanego założenia, że suma błędów przypadkowych jest równa零. Warunek ten nie byłby spełniony przy występowaniu błędów systematycznych. Korzystanie z rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej polega na wnioskowaniu o określonych właściwościach pewnej populacji na podstawie analizy próby pochodzącej z tej populacji.

Podczas analizy błędów przypadkowych próbę stanowią wyniki określonych pomiarów. Najczęściej rozważa się następujące parametry: średnia arytmetyczna populacji (μ), średnia arytmetyczna próby (w_{sr}), odchylenie standardowe populacji (σ) i odchylenie standardowe próby (S). Błędy graniczne pomiaru wyznacza się jako

iloczyn odchylenia standardowego S i liczby t , która jest funkcją przyjętego prawdopodobieństwa. Górnny błąd graniczny: $e_1=+tS$; dolny błąd graniczny: $e_2=-tS$. Wielkość $\pm tS$ nazywamy niepewnością pomiaru, $2tS$ -obszar niepewności pomiaru. Błędy graniczne w terminologii statystycznej to granice ufności, obszar niepewności to przedział ufności, prawdopodobieństwo P – poziom ufności, wielkość $\alpha=1-P$ – poziom istotności.

Jeżeli podczas pomiaru występują zarówno błędy systematyczne, jak i przypadkowe to niedokładność pomiarów wyrażona jest przez zespół błędów granicznych zawierających wszystkie błędy systematyczne i graniczne błędy przypadkowe:

$$|\Delta w_{NP}| = |\sum \Delta w_{syst}| + |tS| \quad (7.5)$$

gdzie:

Δw_{NP} -niedokładność pomiaru,

Δw_{syst} -błąd systematyczny,

tS -przypadkowy błąd graniczny.

7.10. Zakłócenia elektryczne

Zakłóceniami nazywamy szkodliwe oddziaływanie sygnałów niepożądanych na sygnał pomiarowy. Sygnał zakłócający to każdy sygnał w torze pomiarowym, który nie przenosi informacji pomiarowej i nie jest świadomie wprowadzonym sygnałem pomocniczym.

Zakłócenia mogą oddziaływać na sygnał pomiarowy poprzez wzajemne sumowanie lub też modulowanie.

Sygnały zakłócające wewnętrzne powstają w urządzeniach pomiarowych i są efektem: szumów własnych elementów półprzewodnikowych i rezystorów, sygnałów przenikających z kanałów sąsiednich oraz impulsowych przebiegów spowodowanych skokowymi zmianami stanu pracy układów.

Sygnały zakłócające zewnętrzne (np.: tzw. zakłócenia przemysłowe) mają źródła w obwodach instalacji poza urządzeniami pomiarowymi i są to:

- napięcia o charakterze impulsowym i szumowym – komutatorowe silniki elektryczne, układy zapłonowe silników spalinowych, spawarki elektryczne – przenikające do aparatury pomiarowej przez przewody zasilające,
- napięcia o częstotliwości sieci zasilającej odkładające się na wspólnych impedancjach uziemień sieci i odbiorników energii wskutek istnienia rozproszonych zmiennych pól magnetycznych,

- prądy (o dowolnej zmienności czasowej) spowodowane indukowaniem się ładunków na ekranach kabli, blachach obudów zewnętrznych (stanowią elementy sprzężenia pojemnościowego) wskutek występowania zewnętrznych pól elektrycznych,
- siły elektromotoryczne indukowane pod wpływem pól magnetycznych w przewodach sygnałowych kabli, ekranach oraz cewkach i przewodach wewnętrz elementów.

Należy podkreślić, że całkowita eliminacja wszystkich zakłóceń jest niemożliwa, możemy ograniczać wpływ zakłóceń lub minimalizować je jeżeli jest to możliwe w ich źródłach.

Z uwagi na to, że szczególnie podatne na zakłócenia są sygnały analogowe, to jednym ze sposobów minimalizacji zakłóceń jest minimalizacja części analogowej toru pomiarowego, np.: zastosowanie sensorów zintegrowanych lub inteligentnych z wyjściami cyfrowymi.

Do podstawowych środków technicznych zapobiegania występowaniu zakłóceń należą:

- ekranowanie od pól zakłócających,
- racjonalne uziemianie układów pomiarowych,
- stosowanie niskoszumowych i odpornych na zakłócenia układów wzmacniających,
- separacja galwaniczna obwodów,
- filtracja przebiegów w obwodach zasilających i sygnałowych,
- kompensacja okresowo-przemiennych sygnałów zakłócających.

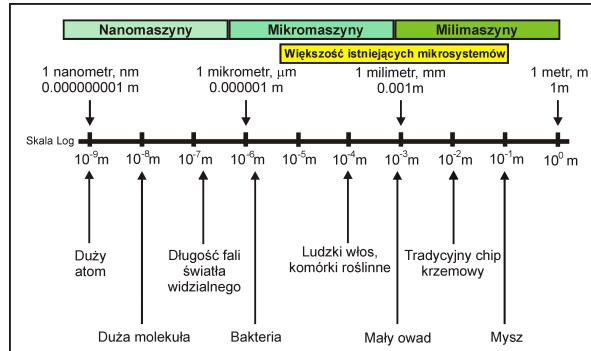
7.11. Micro Electro-Mechanical Systems - MEMS

MEMS to połączenie elementów mechanicznych, czujników, elementów wykonawczych i elektroniki we wspólnym (np.: krzemowym) elemencie w wyniku „mikrofabrykacji” (np.: anizotropowe trawienie). Na rysunku 7.44 pokazano porównanie wielkości elementów MEMS z innymi obiektyami. Maski do procesów wytwarzania wykonywane są w typowych technikach mikroelektronicznych (rys. 7.45), podobnych do wykorzystywanych przy wytwarzaniu przyrządów półprzewodnikowych i układów scalonych (np. fotolitografia). Oprócz krzemu stosuje się również polimery. W przypadku układów polimerowych najczęściej używane technologie to wytłaczanie na gorąco, odlewanie w formie, wtryskiwanie, również można tu wymienić technologie litograficzne.

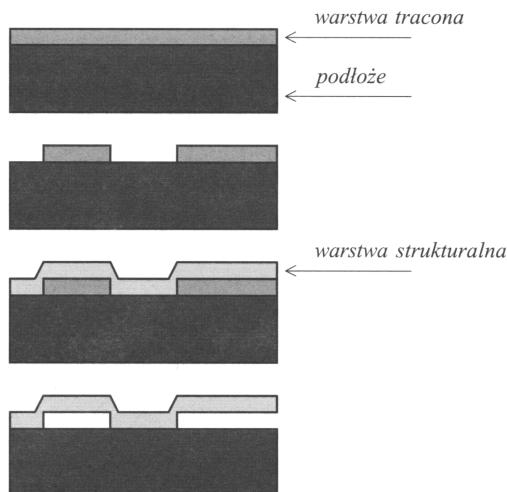
Mozliwości zastosowania przetworników w postaci mikrostruktur są bardzo szerokie i obejmują następujące czujniki:

- przyspieszenia (akcelerometry): uruchomienie poduszek powietrznych, napinaczy pasów:
 - w aparatach fotograficznych – wykrywanie drgań (stabilizacja obrazu),

- w komputerach – wykrywanie swobodnego spadania (zabezpieczenie dysku twardego przed uszkodzeniem w momencie upadku),
- w nowoczesnych zabawkach;



Rys. 7.44. Porównanie wielkości elementów MEMS z „otoczeniem”

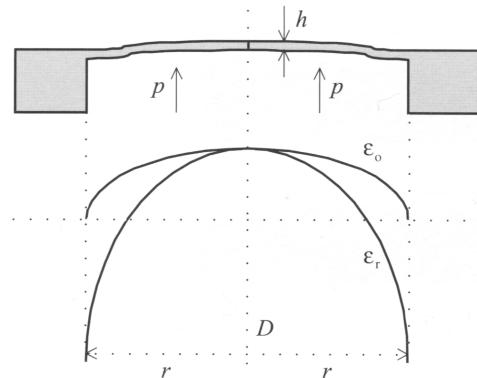


Rys. 7.45. Sposób wykonania mikrostruktur elementów MEMS [37]

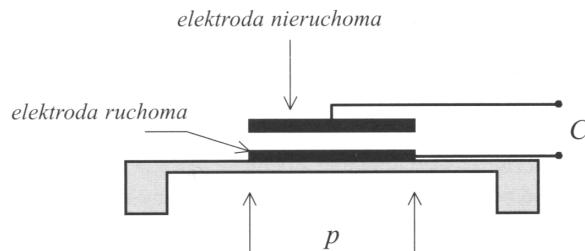
- ciśnienia: reaktory chemiczne, zbiorniki substancji;
- wibracji;
- przepływomierze;
- żyroskopy;
- czujniki pola magnetycznego (wykorzystujące efekt Halla);
- przełączniki optyczne;
- rzutniki;
- głowice drukarek atramentowych;

- elektrody do badania mózgu;
- zegary atomowe;
- mikroreaktory chemiczne (Lab-On-Chip).

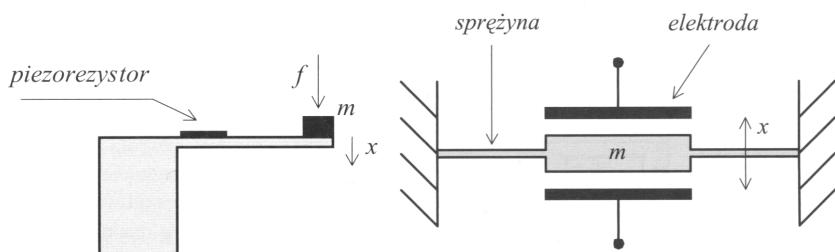
Na rysunkach 7.46-7.50 przedstawiono zasady działania i konstrukcje wybranych przetworników MEMS.



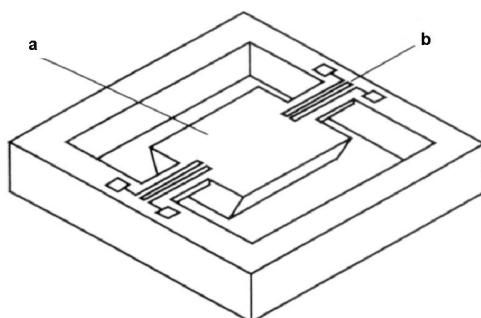
Rys. 7.46. Rozkład odkształceń w kolistej membranie poddanej działaniu ciśnienia [37]



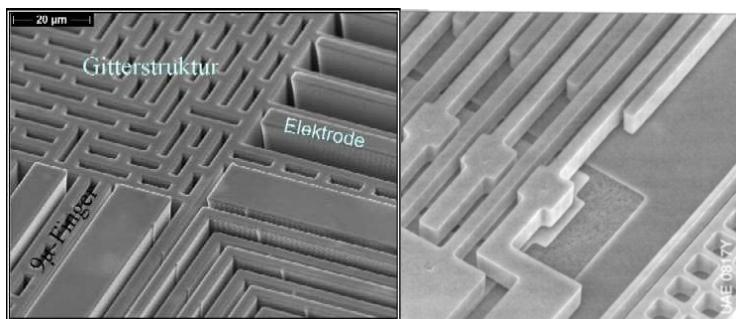
Rys. 7.47. Schemat konstrukcji membranowego przetwornika ciśnienia z czujnikiem pojemnościowym [37]



Rys. 7.48. Akcelerometr: z piezorezystorem i czujnikiem pojemnościowym w układzie różnicowym [37]



Rys. 7.49. Monolityczny przetwornik tensometryczny do pomiaru przyśpieszeń: a) masa sejsmiczna, b) siatka [1]



Rys. 7.50. Struktura pojemościowego elementu mikromechanicznego, zdjęcie mikroskopowe z zaznaczoną strefą struktury siatki, palce o szerokości 9 μm i elektrody [29]

7.12. Standard Commands for Programmable Instruments - SCPI

Standard SCPI (ang. Standard Commands for Programmable Instruments) określa sposób komunikowania się urządzeń pomiarowych z kontrolerem (np. komputerem PC) i jest powszechnie akceptowany przez producentów aparatury kontrolno pomiarowej. Ogłoszono go w 1990 roku jako programowe rozszerzenie normy IEEE 488.2. SCPI nie jest językiem programowania, lecz językiem kontroli urządzeń, czyli zestawem rozkazów interpretowanych i wykonywanych przez urządzenia.

Rozwój języka SCPI nadzoruje SCPI Consortium założone przez firmy Hewlett-Packard, Tektronix, Keithley i Rohde & Schwarz. Obecnie większość producentów aparatury kontrolno-pomiarowej związana jest z konsorcjum i wykonuje urządzenia kompatybilne z IEEE-488.2 oraz językiem SCPI.

Rozkazy języka SCPI są podzielone na grupy rozkazowe (tzw. subsystemy). Każdy subsystem ma hierarchiczną budowę i rozwija się na kolejne poziomy, na których następuje coraz dokładniejsze określenie operacji wykonywanej przez rozkaz.

Niektóre rozkazy posiadają argumenty obligatoryjne lub tylko opcjonalne. Inną systematykę dzieli rozkazy SCPI na:

- wspólne (ang. common commands),
- wymagane (ang. required commands),
- niestandardowe.

Rozkazy wspólne nie zależą od rodzaju urządzenia i związane są przede wszystkim z obsługą układu statusowego, synchronizacją pracy urządzenia z aplikacją sterującą, zerowaniem (resetowaniem), testowaniem i identyfikacją przyrządu oraz przechowywaniem i pobieraniem informacji o jego nastawach. Tę grupę rozkazową język SCPI przejął w całości i bez zmian z normy IEEE-488.2, która określiła jednolitą koncepcję urządzenia pomiarowo-kontrolnego. Rozkazy wymagane przez SCPI to właściwie nazwy grup rozkazowych (subsystemów) odpowiadających modelowi urządzenia SCPI, z których każda zawiera zestaw rozkazów realizujących dostępne w ramach danej grupy operacje. Rozkazy niestandardowe (opcjonalne) nie są objęte normą SCPI, chociaż muszą zachowywać wszystkie wymagania dotyczące struktury i syntaktyki rozkazów SCPI.

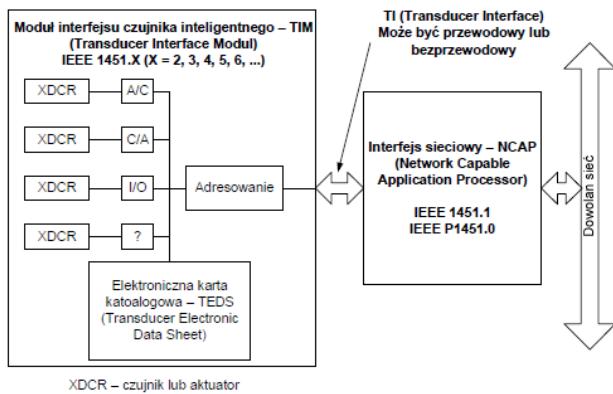
Język SCPI to nie tylko zestaw rozkazów, ale również pewna koncepcja urządzenia przejęta z normy IEEE-488.2 i znacznie rozwinięta. Na wspomnianą koncepcję urządzenia SCPI składają się:

- model urządzenia SCPI,
- protokół wymiany komunikatów z kontrolerem systemu,
- układ statusowy (zwany również systemem statusowym),
- układ wyzwalania operacji,
- „mechanizmy” synchronizacji pracy urządzenia z aplikacją sterującą.

Więcej informacji na temat standardu SCPI odszukać można w ogólnie dostępnej literaturze [26, 28].

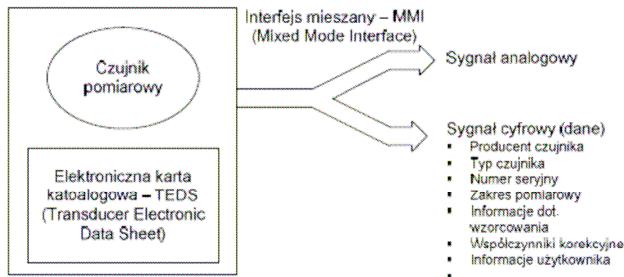
7.13. Transducer Electronic Data Sheet - TEDS

TEDS (ang. Transducer Electronic Data Sheet) jest standardową metodą przechowywania danych o przetworniku (sensorze lub aktorze) służących do jego identyfikacji, kalibracji i korekty, a także informacji producenta. Dane te są przechowywane w pamięci (EEPROM) przetwornika (lub aktora) a więc może być wykorzystywany w sensorach inteligentnych. Struktura takiego przetwornika, zgodnie ze standardem IEEE 1451 [49], jest przedstawiona na rysunku 7.51.



Rys. 7.51. Struktura przetwornika inteligentnego z TEDS [50]

Standard ten miał na celu opracowanie technologii umożliwiającej dołączanie przetworników dowolnego producenta do dowolnej sieci kontrolno-pomiarowej niezależnie od wykorzystywanego protokołu komunikacyjnego – specjalny interfejs sieciowy NCAP (ang. Network Capable Application Processor). Opracowane w ramach standardu szablony TEDS umożliwiają prawie bezobsługową konfigurację wielu rodzajów czujników w systemie pomiarowym rys. 7.52.

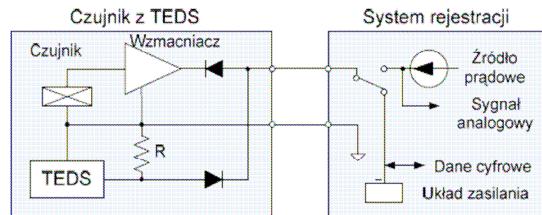


Rys. 7.52. Moduł czujnika pomiarowego wyposażonego w elektroniczną kartę katalogową TEDS [50]

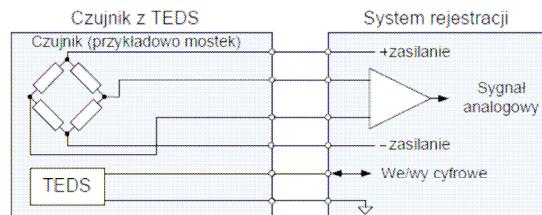
Istnieje możliwość zastosowania TEDS do czujników w istniejących już systemach pomiarowych. Można wykorzystać informacje zapisane w pamięci kontrolera systemu pomiarowego, np.: dysku komputera, a więc wykorzystać technologię Virtual TEDS. Innym rozwiązaniem jest doposażenie przetwornika w pamięć EEPROM, co wymaga zmiany okablowania (pamięć TEDS można zamontować wprost na kablu lub przy złączu od strony czujnika lub urządzenia rejestrującego) i uzupełnić system pomiarowy o urządzenie rejestrujące umożliwiające odczyt i zapis danych do pamięci TEDS (np.: karta pomiarowa kompatybilna z TEDS i moduł zacisków TEDS). Do podłączania czujnika zaprojektowano interfejs mieszany MMI (ang. Mixed Mode Interface). Istnieją dwie klasy interfejsu MMI, oba bazują na interfejsie

komunikacyjnym 1-wire. Interfejs klasy 1 (rys. 7.53) przewidziano dla urządzeń, w których zasilanie wbudowanej elektroniki dostarczane jest przewodem sygnałowym (np.: piezoelektryczne mikrofony i akcelerometry). Interfejs klasy 2 (rys. 7.54) wykorzystuje się, gdy nie jest możliwe współdzielienie przewodu sygnałowego dla danych TEDS.

Dużą zaletą TEDS jest istnienie dużej ilości szablonów TEDS. Szablon ten to część elektronicznej karty katalogowej TEDS i zawiera dane dotyczące konkretnego typu i egzemplarza przetwornika. Poprawna konfiguracja czujnika wymaga informacji zawartych w Basic TEDS (zawartość TEDS w tab. 7.2), które są obligatoryjne. Pozostałe dane: szablon standardowy, szablon konfiguracji i dane użytkownika, są opcjonalne. Basic TEDS zawierają jedynie informacje odnośnie producenta i modelu czujnika. Dla pełniejszej konfiguracji czujnika w systemie pomiarowym, niezbędne jest skorzystanie z pozostałych szablonów. Opracowano wiele szablonów standardowych w celu opisu różnych typów istniejących czujników (np.: termoelementy, akcelerometry, tensometry), a także szablony uniwersalne, dla czujników z wyjściem napięciowym, rezystancyjnym i prądowym. Szablony kalibracji mogą być wykorzystane do zapisania charakterystyki czujnika uzyskanej w procesie kalibracji. Dane użytkownika mogą zawierać np.: informacje identyfikujące użytkownika lub miejsce lokalizacji czujnika na obiekcie.



Rys. 7.53. Interfejs MMI klasy 1 [50]



Rys. 7.54. Interfejs MMI klasy 2 [50]

Dane na karcie katalogowej nie mogą zajmować więcej niż 256 bitów dla jednego czujnika. Szablony TEDS zapisane są w formacie ASCII. Opracowano specjalny interpreter danych zapisanych w TEDS, nazwany TDL (ang. Template Description Language). Poszczególne bity zawarte w TEDS są dekodowane z wykorzystaniem

szablonu dla konkretnego czujnika. Wyjątek stanowią wartości liczbowe, które są zapisane bezpośrednio w pamięci TEDS czujnika.

Tab 7.2. Zawartość elektronicznej karty katalogowej TEDS [50]

Informacje podstawowe (Basic TEDS) 64 bity
Szablon standardowy (Standard Template TEDS; identyfikator od 25 do 39)
Szablon kalibracji (Calibration Template TEDS; identyfikatory od 40 do 42)
Dane użytkownika (User Data)

7.14. Wielowymiarowe przetworniki sił i momentów

Złożone stany obciążenia w parach kinematycznych maszyn wymagają opracowywania przetworników pomiarowych, umożliwiających kompleksową analizę stanu obiektu. W ogólnym przypadku należy rozważyć sześć składowych obciążenia: trzy siły i trzy momenty ($F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ – w układzie kartezjańskim osie X, Y, Z są wzajemnie prostopadłe). Pomiar wszystkich składowych obciążenia wymaga budowy takiej samej liczby przetworników elementarnych, z których każdy „osobno” mierzyłby „swoją” składową obciążenia. Realizacja takiego przetwornika w technologiach używanych do produkcji przetworników MEMS jest trudna, ale możliwa do realizacji (np.: warstwowa realizacja przetworników wykorzystujących zjawisko piezoelektryczne). Realizacja wielowymiarowego przetwornika obciążenia w postaci odkształcalnego elementu, co jest typowym rozwiązaniem, nastręcza wielu trudności: powinien on posiadać wiele stref podatnych na ścinanie lub zginanie (zależy od konstrukcji przetwornika), które powinny reagować tylko na jedną, przewidzianą składową obciążenia. Przy większej liczbie składowych obciążenia jest to praktycznie nie do zrealizowania. W ogólnym przypadku niezbędne jest opracowanie i uzyskanie takiej charakterystyki złożonego sensora, która zawiera, obok współczynników głównych (główna przekątna macierzy C równania 7.7), również współczynniki oddziaływania, które ujmują interakcje pomiędzy poszczególnymi składowymi obciążenia i sygnałami mierzonymi. Wygodnie jest taką charakterystykę przedstawić w postaci równania macierzowego [7, 9], które dla układu liniowego może wyglądać następująco:

$$O = C \cdot U \quad (7.6)$$

lub też:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

gdzie:

O – wektor obciążenia,

C – macierz współczynników,

U – wektor sygnałów wyjściowych.

Macierz współczynników czułości C nazywana jest również macierzą przejścia i uzyskuje się ją eksperymentalnie, obciążając czujnik znanymi, poszczególnymi składowymi wektora obciążenia O . Taki sposób opisu i wyznaczania charakterystyki pozwala uwzględnić interakcje pomiędzy składowymi obciążenia i sygnałami wyjściowymi spowodowanymi np.: błędami wykonawczymi [7]. Przetwarzanie wektora sygnałów wyjściowych może być realizowane przez układy elektroniczne zabudowane wewnątrz przetwornika (będzie to wielowymiarowy sensor inteligentny) lub przez oddzielne tory pomiarowe, osobno dla każdej składowej obciążenia.

Literatura

- [1] Adam W., Busch M., Nickolay B., *Sensoren fuer die Produktionstechnik*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1997.
- [2] Bitter R., Mohiuddin T., Nawrocki M. Raton B., *LabVIEW: advanced programming techniques*, CRC Press/Taylor & Francis Group, London, New York 2007.
- [3] Carden F., Jedlicka R., Henry R., *Telemetry systems engineering*, Artech House, Boston 2002.
- [4] Catman 4.5. Operating Manual, Hottinger Baldwin Messtechnik.
- [5] Chruściel M. *LabVIEW w praktyce*, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2008.
- [6] Chwaleba A., Czajewski J., *Przetworniki pomiarowe i defektoskopowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
- [7] Dudziński P. *Niekonwencjonalny przetwornik do pomiaru sił i momentów w parach obrotowych maszyn*, II Konferencja Naukowa Metody Doświadczalne w Budowie i Eksploatacji Maszyn, Wrocław-Szklarska Poręba 1995.
- [8] Gajek A., Juda Z., *Czujniki*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.
- [9] Heimann B., Gerth W., Popp K., *Mechatronik: Komponenten - Methoden - Beispiele*, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser, München Verlag, 2001.
- [10] Jarosz M. i zespół, *Słownik Wyrazów Obcych*, Wydawnictwo Europa, pod redakcją naukową prof. Ireny Kamińskiej-Szmaj, 2001 r.).
- [11] Kurytnik I.P., Karpiński M., *Bezprzewodowa transmisja informacji*, Wydawnictwo Pomiary Automatyka Kontrola, Warszawa 2008.
- [12] Kwaśniewski J., Wprowadzenie do inteligentnych przetworników pomiarowych, WNT, Warszawa 1993.
- [13] Lesiak P., Świsulski D., *Komputerowa technika pomiarowa w przykładach*, Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa 2002.
- [14] Materiały informacyjne firmy AB MICRO.
- [15] Materiały informacyjne firmy Eltron.
- [16] Materiały informacyjne firmy Flir.
- [17] Materiały informacyjne firmy Hengstler.
- [18] Materiały informacyjne firmy Hottinger Baldwin Messtechnik.
- [19] Materiały informacyjne firmy Introl.
- [20] Materiały informacyjne firmy Keithley.
- [21] Materiały informacyjne firmy National Instruments.
- [22] Materiały informacyjne firmy Royal Networks.
- [23] Materiały informacyjne firmy Tektronix.
- [24] Materiały informacyjne firmy Wobit.
- [25] Michalski L., Eckersdorf K., *Pomiary temperatury*, WNT, Warszawa 1986.
- [26] Mielczarek W., *Komputerowe systemy pomiarowe – standardy IEEE-488.2 i SCPI*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [27] Mielczarek W., *Szeregowe interfejsy pomiarowe*, Helion, Gliwice 1993.
- [28] Mielczarek W., *Urządzenia i systemy kompatybilne ze standardem SCPI*, Helion, Gliwice 1999.
- [29] Mikroelektronika w pojazdach samochodowych, WKiŁ, 2004.
- [30] Missalowa J., Missala T., *Elektryczne pomiary wielkości mechanicznych*, PWN, Warszawa, 1971.
- [31] Nawrocki W., *Komputerowe systemy pomiarowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.

- [32] Nawrocki W., *Rozproszone systemy pomiarowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
- [33] Nawrocki W., *Sensory i systemy pomiarowe*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- [34] Płoski Z., *Słownik Encyklopedyczny – Informatyka*, Wydawnictwa Europa, 1999 r.).
- [35] Rudy van de Plassche, Scalone przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe, WKŁ, Warszawa, 1997.
- [36] Rząsa M.R., Kiczma B., *Elektryczne i elektroniczne czujniki temperatury*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2005.
- [37] Sidor T., *Elektroniczne przetworniki pomiarowe*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2006.
- [38] Sieci wymiany danych w pojazdach samochodowych, Robert Bosch GmbH, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.
- [39] Styburski W., Przetworniki tensometryczne. Konstrukcja, projektowanie, użytkowanie, WNT, Warszawa, 1971.
- [40] Sydenham P.H., *Podręcznik metrologii*, WKŁ, Warszawa 1988.
- [41] Szumielewicz B., Słomski B., Styburski W., *Pomiary elektroniczne w technice*, WNT, Warszawa, 1982.
- [42] Świsulski D., Komputerowa technika pomiarowa. Oprogramowanie wirtualnych przyrządów pomiarowych w LabVIEW, Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa 2005.
- [43] Tłaczała W. Środowisko LabVIEW w eksperymencie wspomagany komputerowo, WNT, Warszawa 2002.
- [44] Travis J., *LabVIEW for Everyone*, Prentice-Hall, Upper Saddle River 2002.
- [45] Tumański S., *Cienkowarstwowe czujniki magnetorezystancyjne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
- [46] Tumański S., *Technika pomiarowa*, WNT, Warszawa 2007.
- [47] Winiecki W., Nowak J., Stanik S., *Graficzne zintegrowane środowiska programowe*, Wydawnictwo Mikom, Warszawa 2001.
- [48] Winiecki W., *Organizacja komputerowych systemów pomiarowych*, , Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
- [49] www.ieee.org.
- [50] Wyżgolik R., IEEE 1451 - interfejs przetwornika inteligentnego, Kongres Metrologii, Kraków 2009.
- [51] Zajda Z., Żebrowski L., *Urządzenia i układy automatyki*, skrypt PWr, Wrocław, 1993.
- [52] Zimmermann W., *Magistrale danych w pojazdach: protokoły i standardy*; Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.